

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.

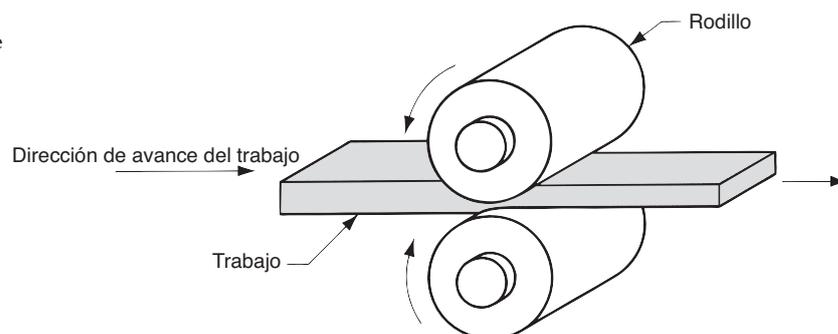
Los procesos de deformación volumétrica que se cubren en este capítulo son: 1) laminado, 2) forjado, 3) extrusión, 4) estirado de alambre y barras. El capítulo también documenta las variantes y operaciones afines a los cuatro procesos básicos que se han desarrollado a través de los años.

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.



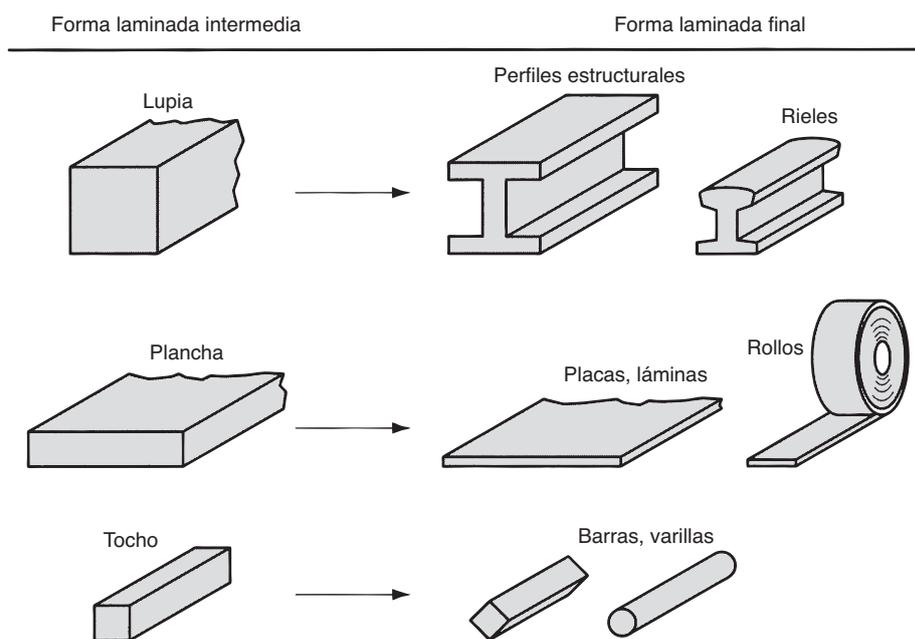
La fabricación de acero representa la aplicación más común de las operaciones de laminación (véase Nota histórica 19.1). Se analizará la secuencia de pasos en un molino de laminación para ilustrar la variedad de productos que pueden hacerse. En otras industrias metálicas básicas se encuentran pasos similares. 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 °C (2 200 °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 × 150 mm (6 × 6 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 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.

www.elsolucionario.net

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 reemplazaron 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.

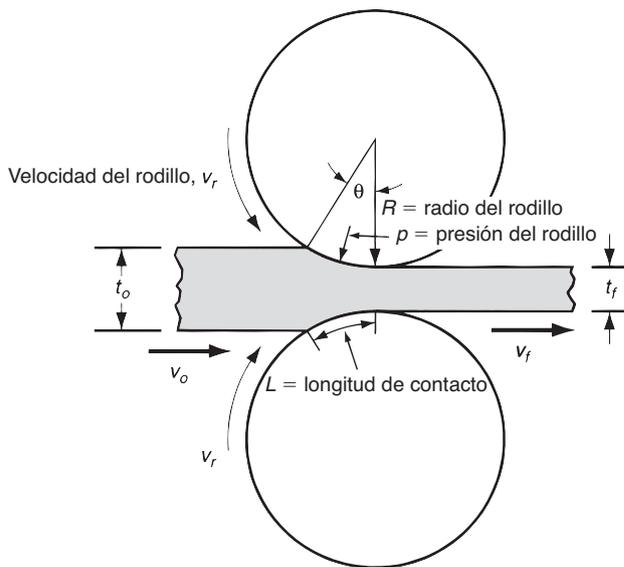


FIGURA 19.3 Vista lateral del laminado plano en la que se muestra el espesor antes y después, las velocidades de trabajo, el ángulo de contacto con los rodillos y otras características.

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:

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \tag{19.5}$$

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,

$$\epsilon = \ln \frac{t_o}{t_f} \tag{19.6}$$

Se puede usar la deformación real para determinar el esfuerzo de fluencia promedio Y_f aplicado al material de trabajo en el laminado plano. De la ecuación 18.2 del capítulo anterior, se sabe que

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

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

$$d_{\text{máx}} = \mu^2 R \tag{19.8}$$

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,

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

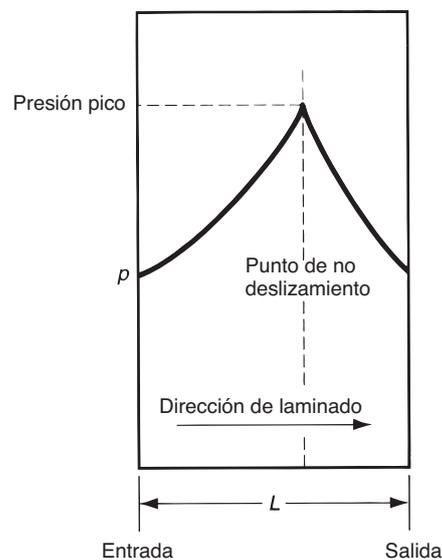


FIGURA 19.4 Variación típica de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la integración de la ecuación 19.9, es la fuerza de laminación F .

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

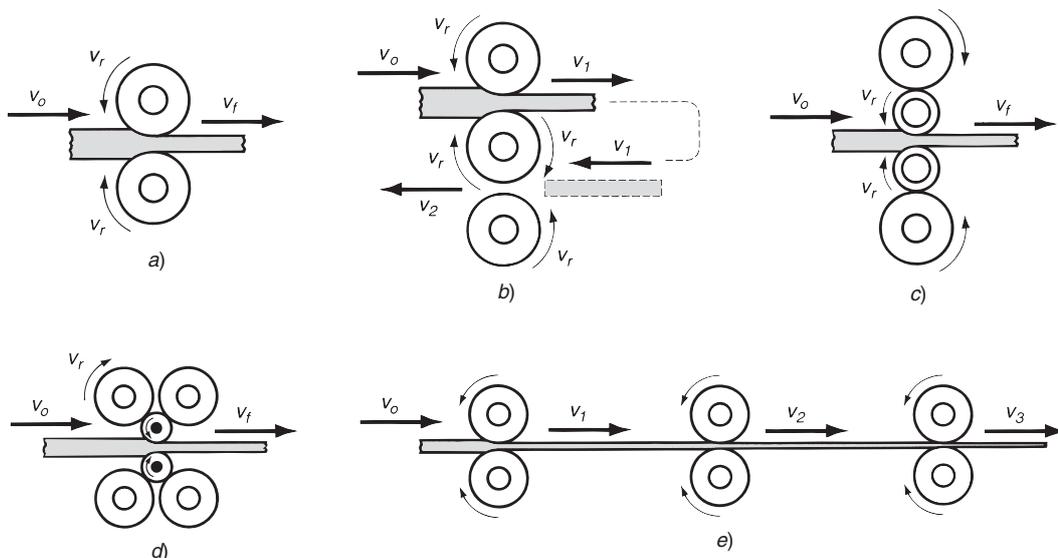


FIGURA 19.5 Varias configuraciones de molinos de laminación: a) dos rodillos, b) tres rodillos, c) cuatro rodillos, d) molino en conjunto y e) molino de rodillos en tándem.

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.

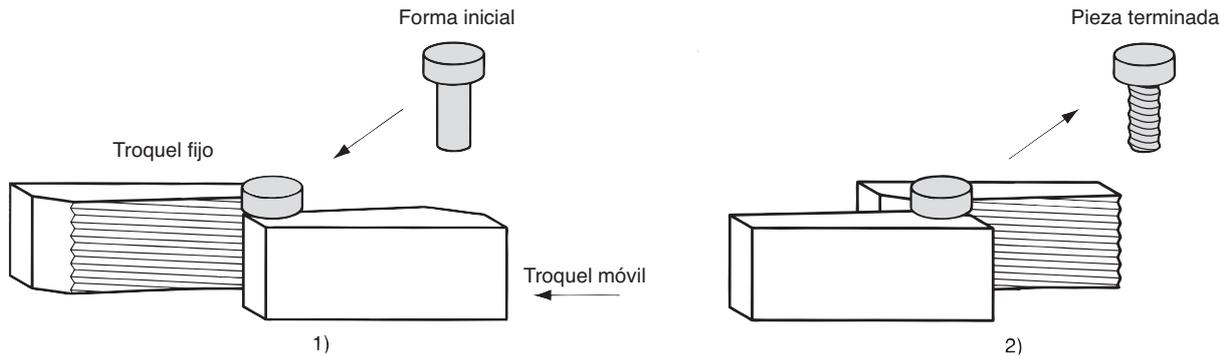


FIGURA 19.6 Laminado de cuerdas con troqueles planos: 1) inicio del ciclo y 2) fin del ciclo.

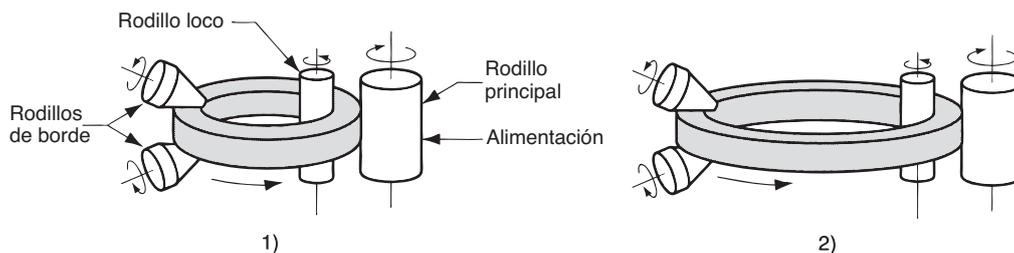
Laminado de cuerdas El laminado de cuerdas se usa para formar cuerdas en piezas cilíndricas mediante su laminación entre dos troqueles. Es el proceso comercial más importante para producción masiva de componentes con cuerdas externas (pernos y tornillos, por ejemplo). El proceso competidor es el maquinado 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.



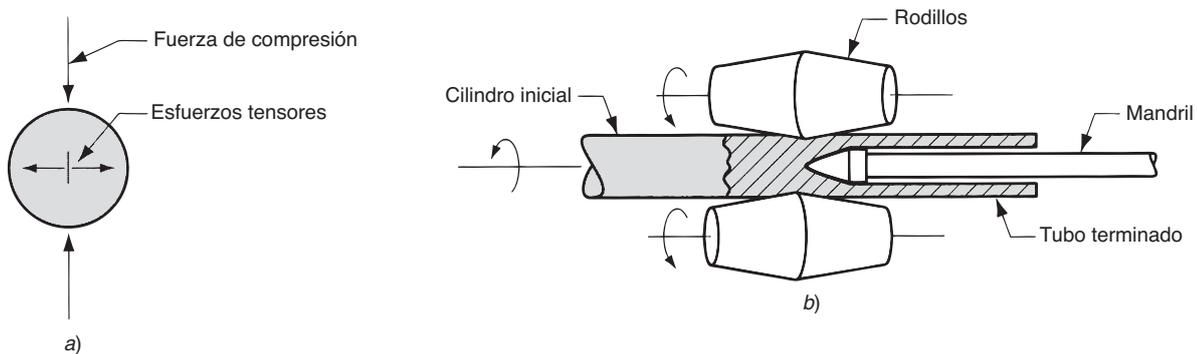


FIGURA 19.8 Perforación de rodillos: a) formación de esfuerzos internos y de la cavidad por compresión de la pieza cilíndrica y b) disposición del molino de laminación Mannesmann para producir tubo sin costura.

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.

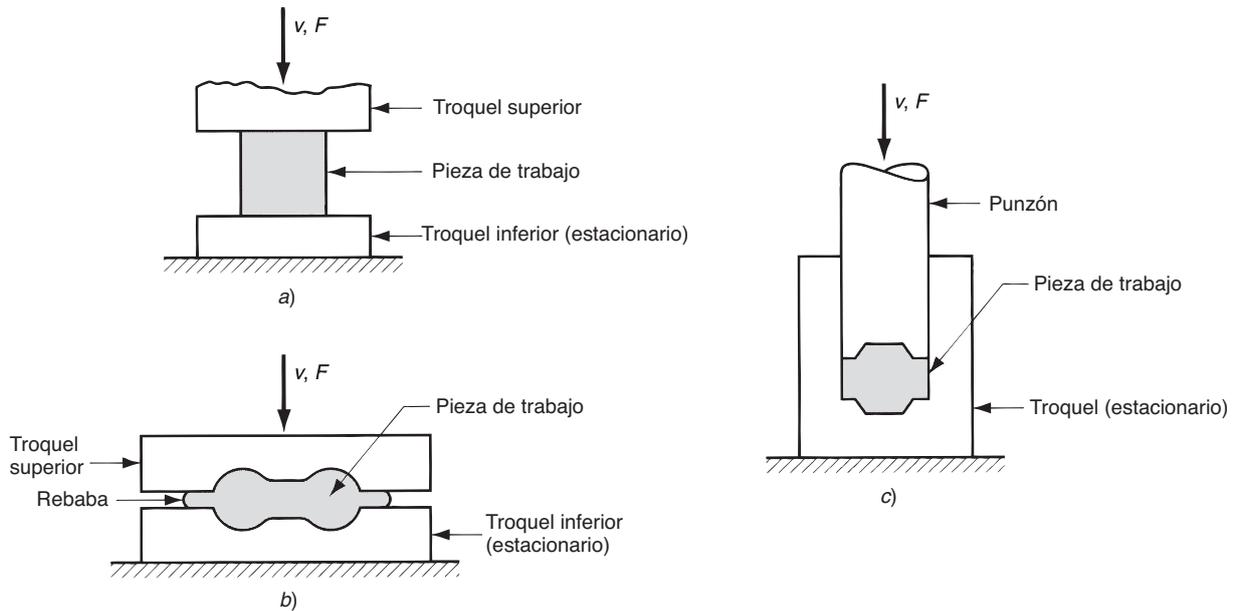


FIGURA 19.9 Tres tipos de operación de forja ilustrados por diagramas de sección transversal: a) forjado en troquel abierto, b) forjado en troquel impresor y c) forjado sin rebaba.

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.

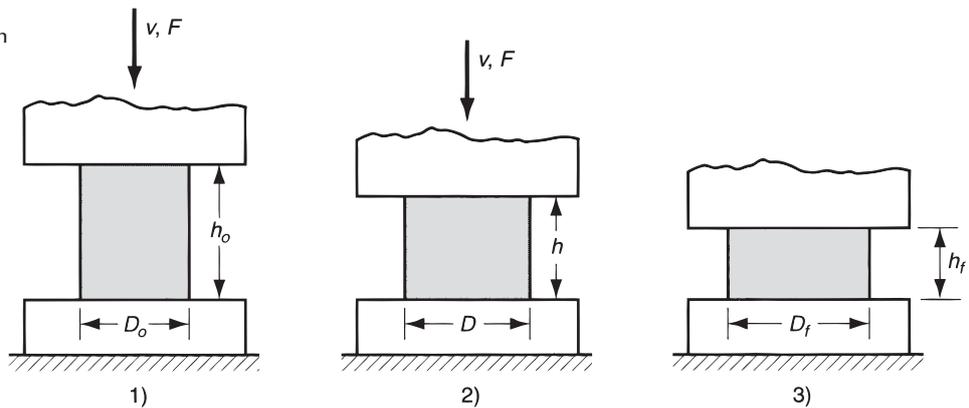
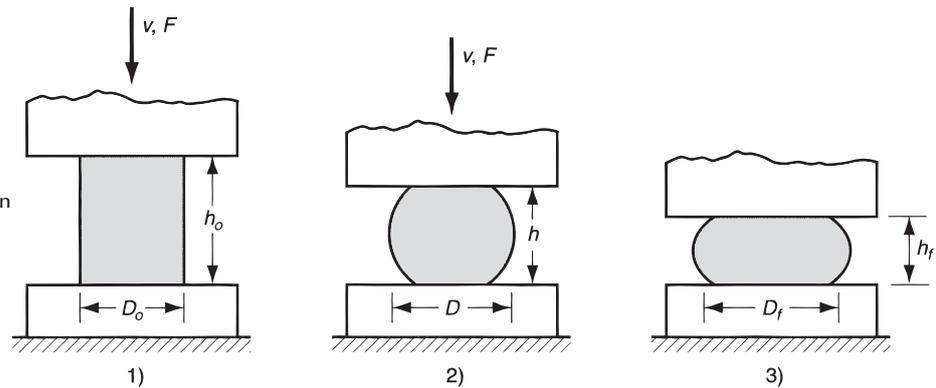


FIGURA 19.11 Deformación real de una pieza de trabajo cilíndrica en forjado en troquel abierto en la que se muestra un abarrilamiento pronunciado: 1) inicio del proceso, 2) deformación parcial y 3) forma final.



Se puede estimar la fuerza para ejecutar el recalado. 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 recalado 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 recalado 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 abarilamiento,

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

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

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

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

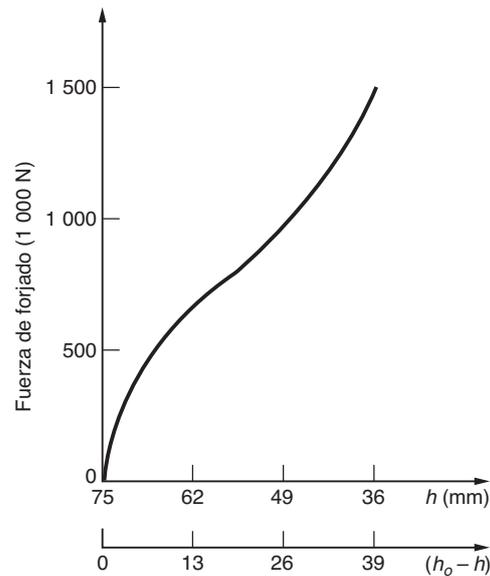


FIGURA 19.12 Fuerza de recalado en función de la altura h y de la reducción de altura $(h_0 - h)$. A esta gráfica se le llama algunas veces curva carga-colada.

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

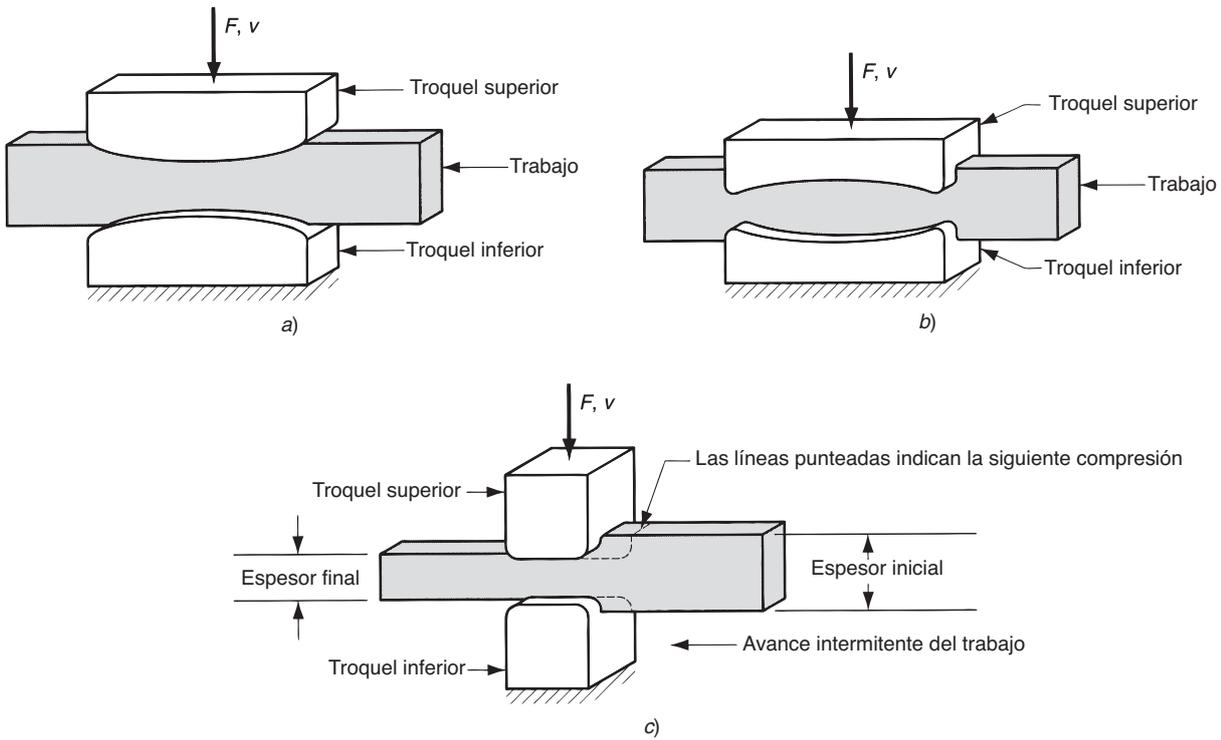


FIGURA 19.13 Varias operaciones de forjado en troquel abierto: a) con troqueles convexos, b) con troqueles cóncavos y c) por secciones.

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.

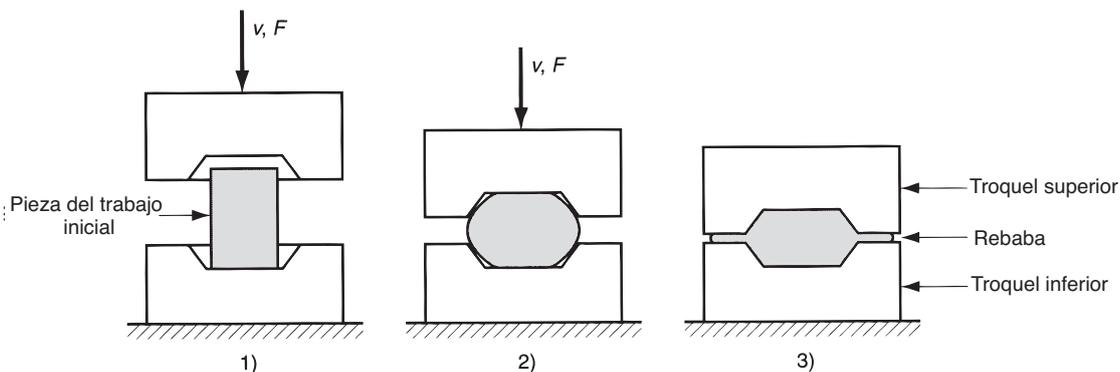


TABLA 19.1 Valores típicos de K_f para varias formas de la pieza en forjado con troquel impresor y en forjado sin rebabas.

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, mm² (in²); Y_f = esfuerzo de fluencia del material, MPa (lb/in²); 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.

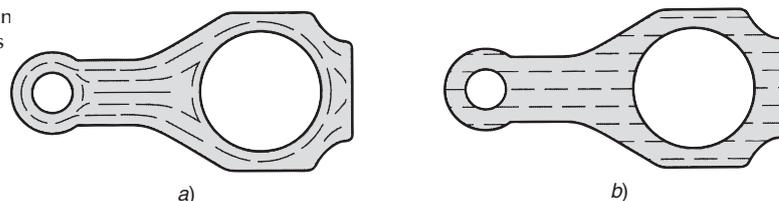
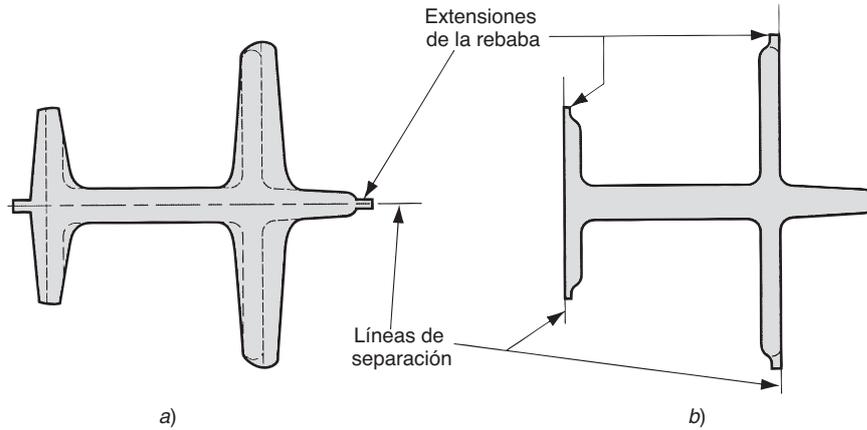


FIGURA 19.16 Secciones transversales de a) forjado convencional y b) forjado de precisión. Las líneas punteadas en a indican los requerimientos de maquinado posterior para convertir una pieza de forjado convencional en una forma equivalente a la de forjado de precisión. En ambos casos tiene que recortarse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



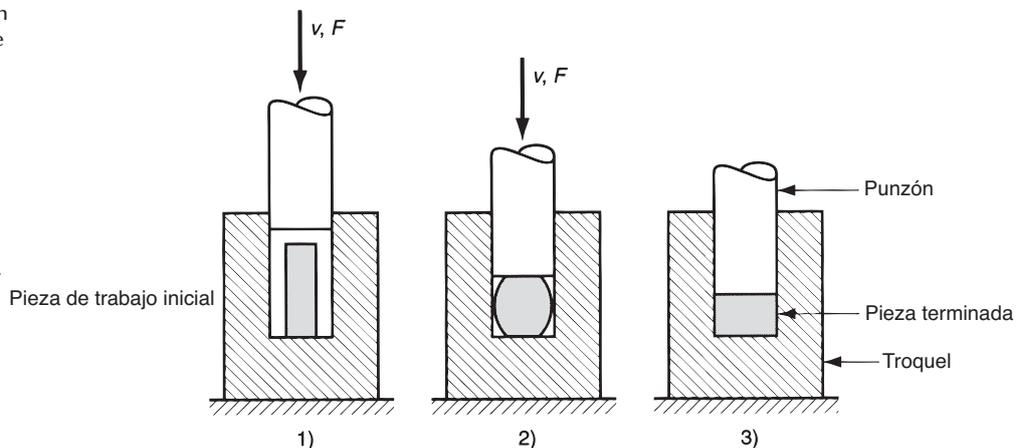
www.elsolucionario.net

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.



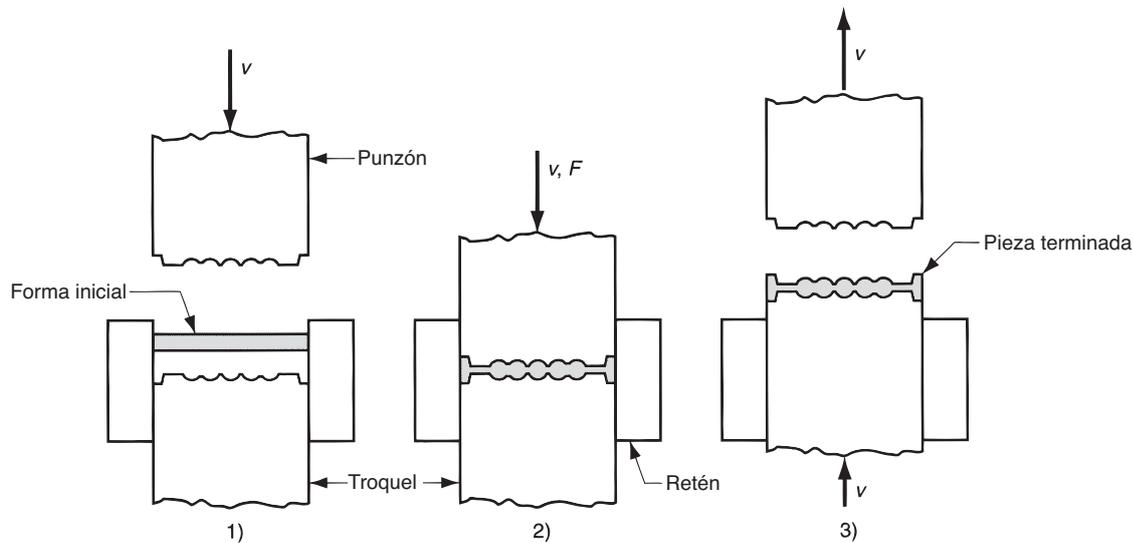


FIGURA 19.18 Operación de acuñado: 1) inicio del ciclo, 2) tiempo de compresión y 3) remoción de la pieza terminada.

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 **martinetes de caída libre por gravedad** generan su energía por el peso de un pistón que cae libremente. La fuerza del golpe se determina por

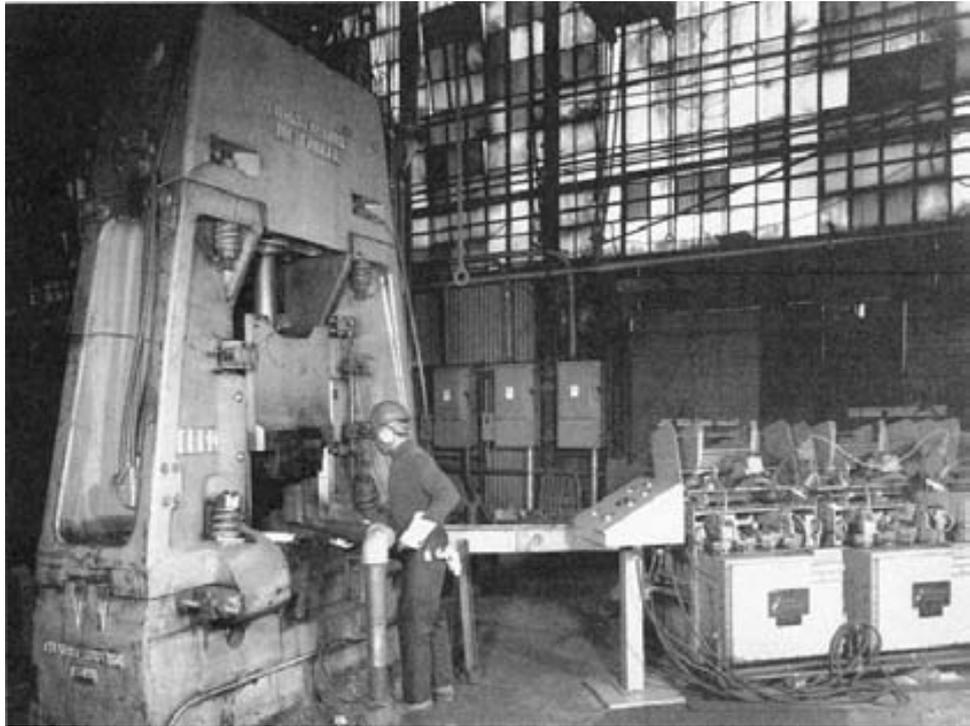


FIGURA 19.19 Martinete de forjado de caída libre alimentado por un transportador y unidades de calentamiento a la derecha de la foto (foto cortesía de Chambersburg Engineering Company).

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

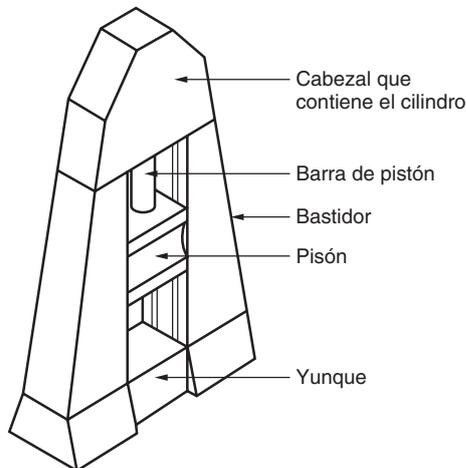
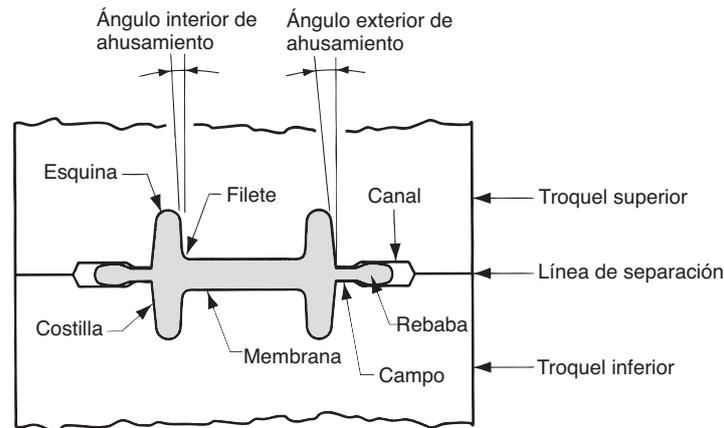


FIGURA 19.20 Detalles de un martinete de caída libre para forjado con troquel impresor.

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 pisón 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

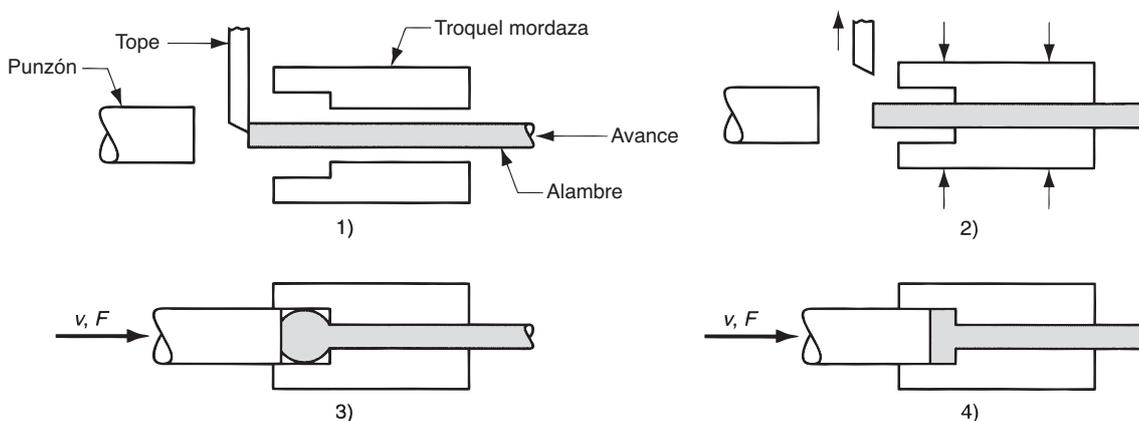
Además de las operaciones convencionales de forja descritas en las secciones anteriores, hay otras operaciones de formado de metal que se asocian muy cerca con el forjado.

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.



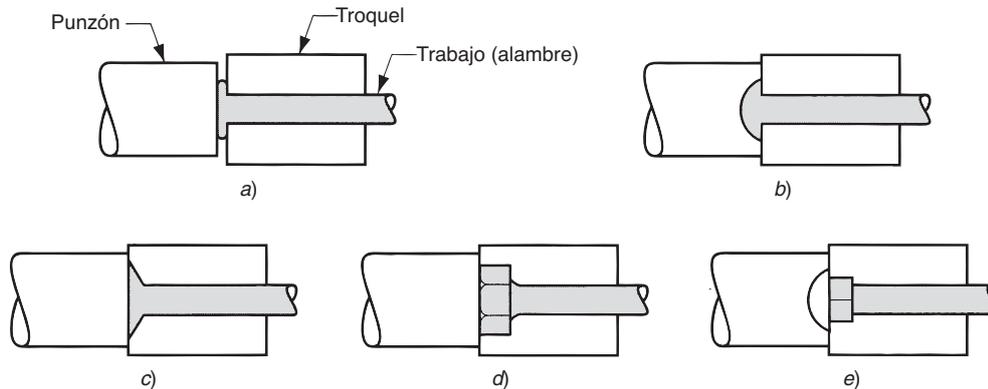
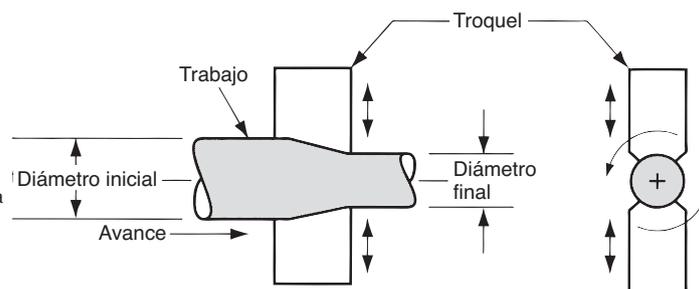


FIGURA 19.23 Ejemplos de formación de cabezas (forjado recalcado): a) cabeza de clavo mediante troqueles abiertos, b) cabeza redonda formada por el punzón, c) y d) cabezas formadas por el troquel y e) perno de carro formado por el troquel y el punzón.

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.



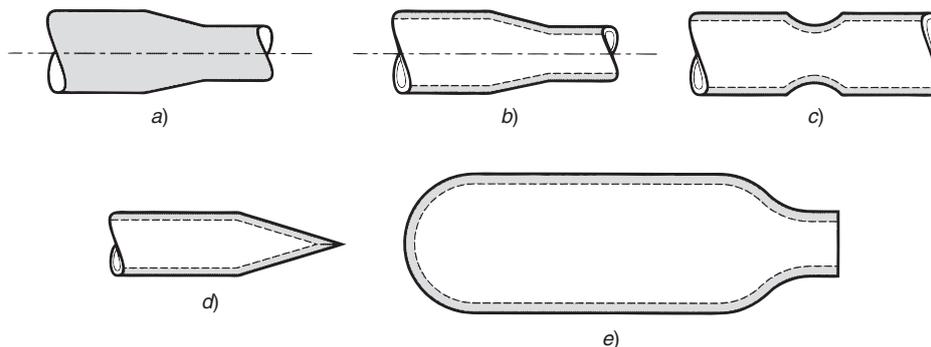
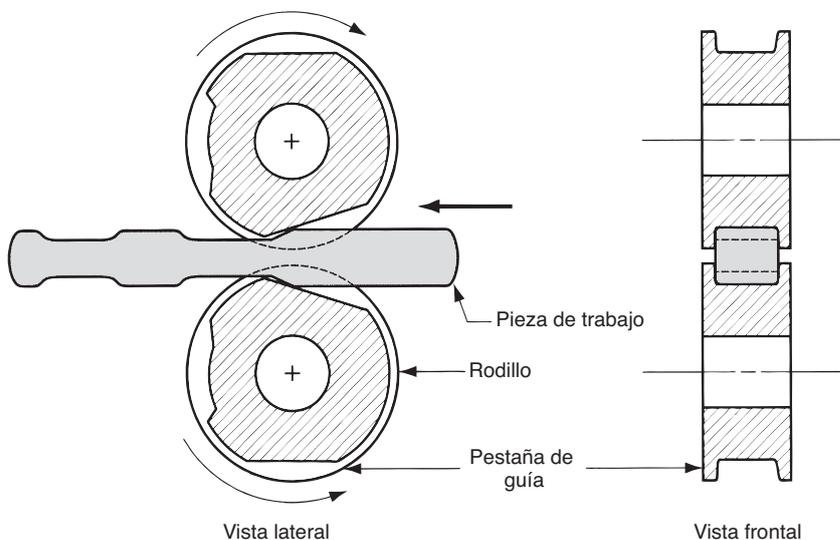


FIGURA 19.25 Ejemplos de piezas hechas por estampado: a) reducción de material sólido, b) ahusado de un tubo, c) estampado para formar un canal en un tubo, d) afilado de un tubo y e) estampado del cuello en un cilindro de gas.

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.



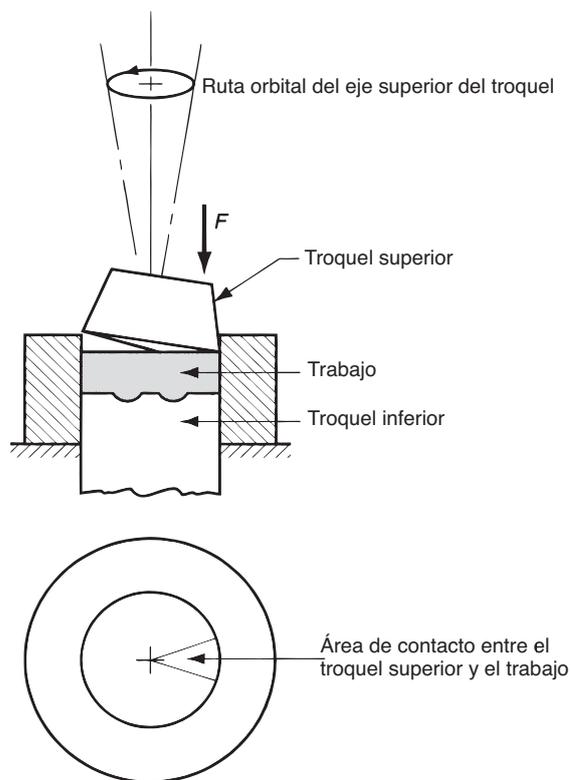
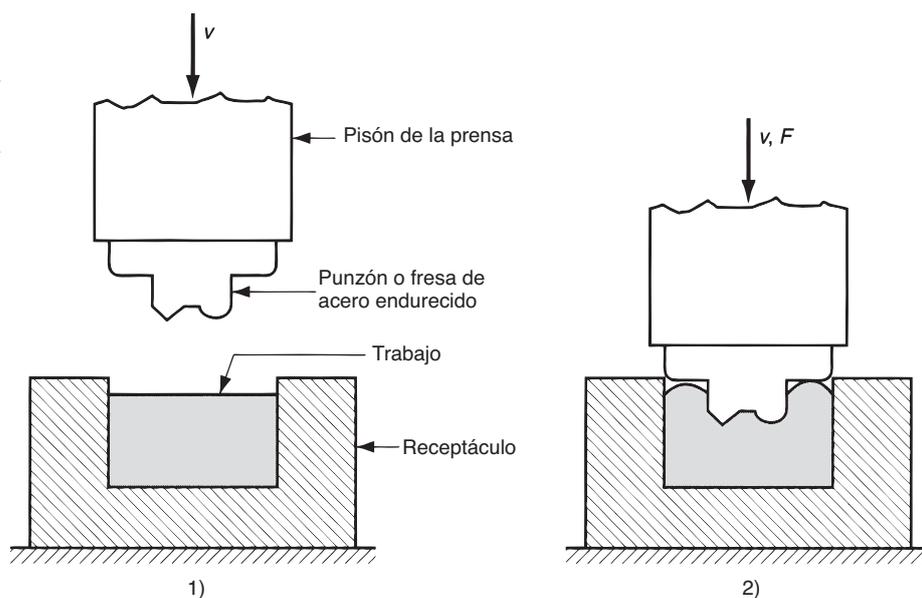


FIGURA 19.27 Forjado orbital. Al final del ciclo de deformación, el troquel inferior se eleva para expulsar la pieza.

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.



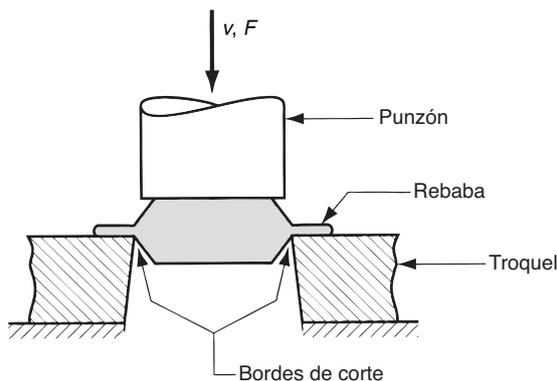


FIGURA 19.29 Operación de recorte (proceso de cizalla) para remover la rebaba después del forjado con troquel impresor.

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

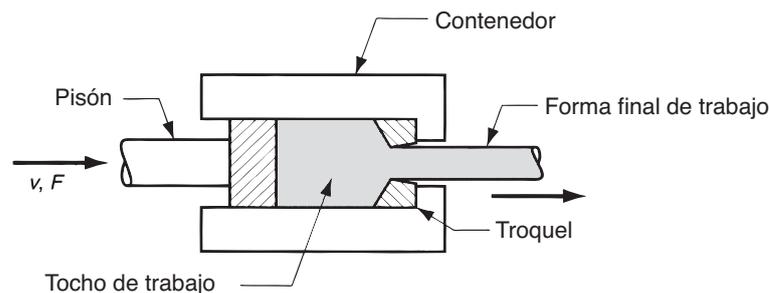
La extrusión se lleva a cabo de varias maneras. Una forma de clasificar las operaciones es atendiendo a su configuración física; se distinguen dos tipos principales: extrusión directa y extrusión indirecta. Otro criterio es la temperatura de trabajo; en frío, en tibio o en caliente. Por último, el proceso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



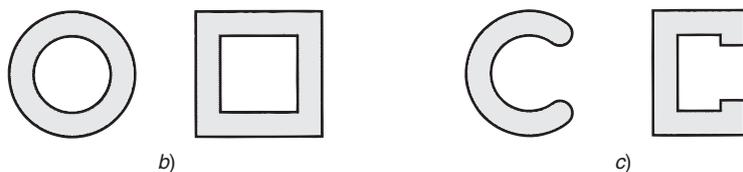
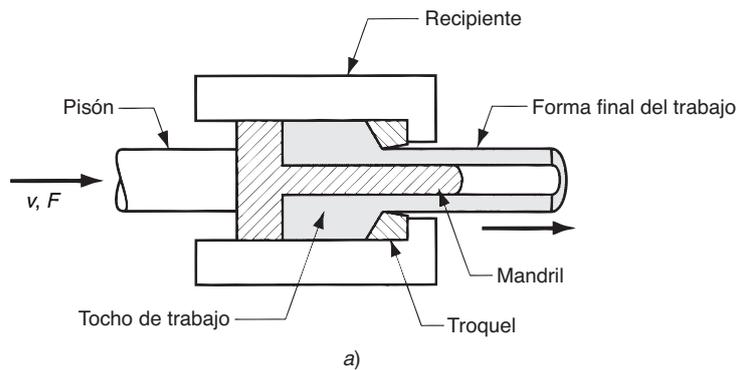


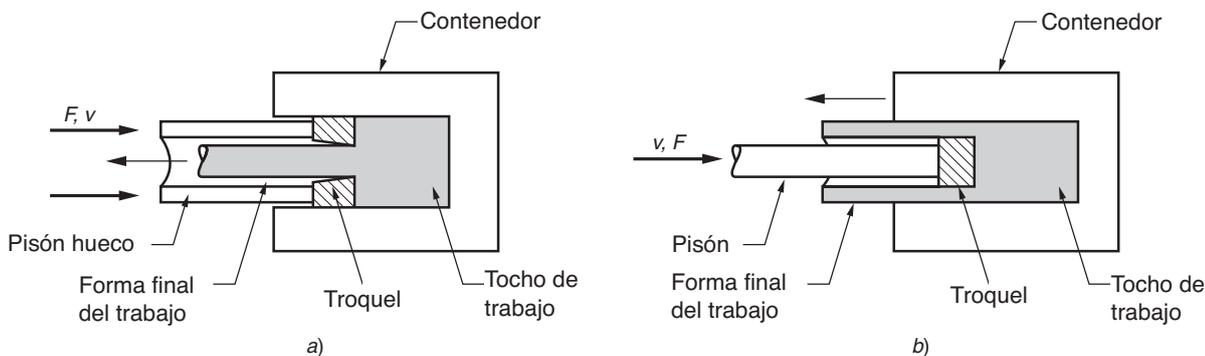
FIGURA 19.31 a) Extrusión directa para producir una sección transversal hueca o semihueca; b) hueca y c) semihueca.

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 pistón, en lugar de estar en el extremo opuesto del recipiente. Al penetrar el pistón en el trabajo, fuerza al metal a fluir a través del claro en una dirección opuesta a la del pistón. Como el tocho no se mueve respecto al recipiente, no hay fricción en las paredes del recipiente. Por consiguiente, la fuerza del pistón es menor que en la extrusión directa. Las limitaciones de la extrusión en directo se deben a la menor rigidez del pistón 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 pistón presiona en el tocho, forzando al material a fluir alrededor del pistón 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

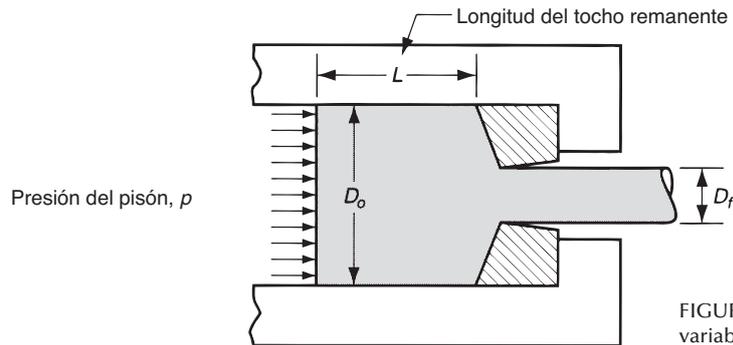


FIGURA 19.33 Presión y otras variables en la extrusión directa.

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:

$$m p_c p D_o L = Y_s p D_o L$$

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 :

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

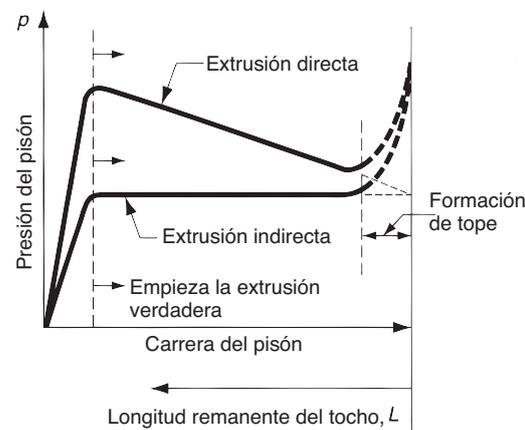


FIGURA 19.34 Gráficas típicas de la presión contra la carrera del pistón (y la longitud remanente del tocho) para extrusión directa e indirecta. Los valores más altos de la extrusión directa resultan de la fricción en las paredes del recipiente. La forma de la acumulación de la presión al inicio de la 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 pisón 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 pisón, N (lb); v = velocidad del pisón, 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 pisón se mueve hacia delante.

Solución: Se examina la presión del pisón 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 pisón contra la carrera del pisón en la figura 19.34. El cálculo siguiente es el valor mínimo hipotético de la presión del pisón 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

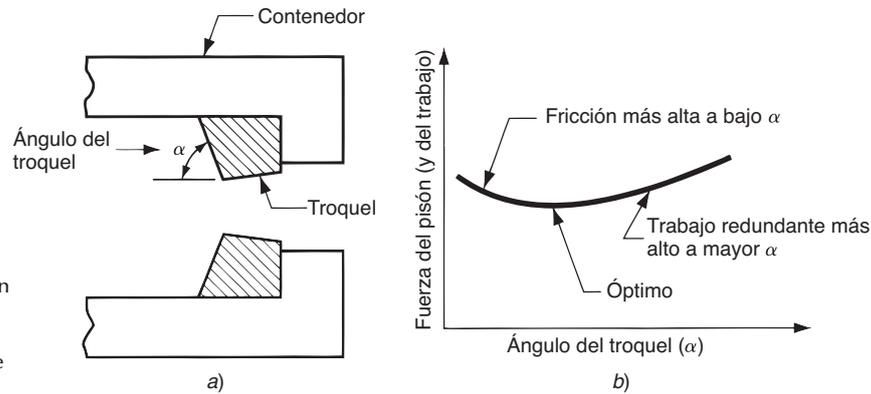


FIGURA 19.35 a) Definición del ángulo del troquel en extrusión directa, b) efecto del ángulo del troquel sobre la fuerza del pisón.

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:

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

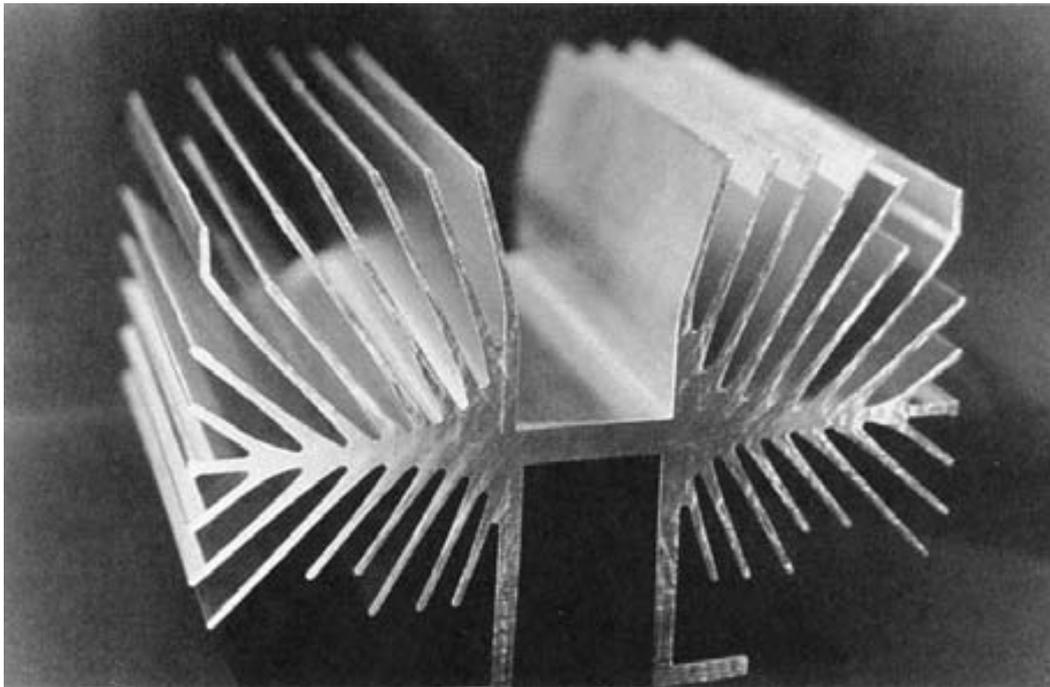


FIGURA 19.36 Una extrusión de sección transversal compleja para un disipador de calor (foto cortesía de Aluminum Company of America).

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 pistón.

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.

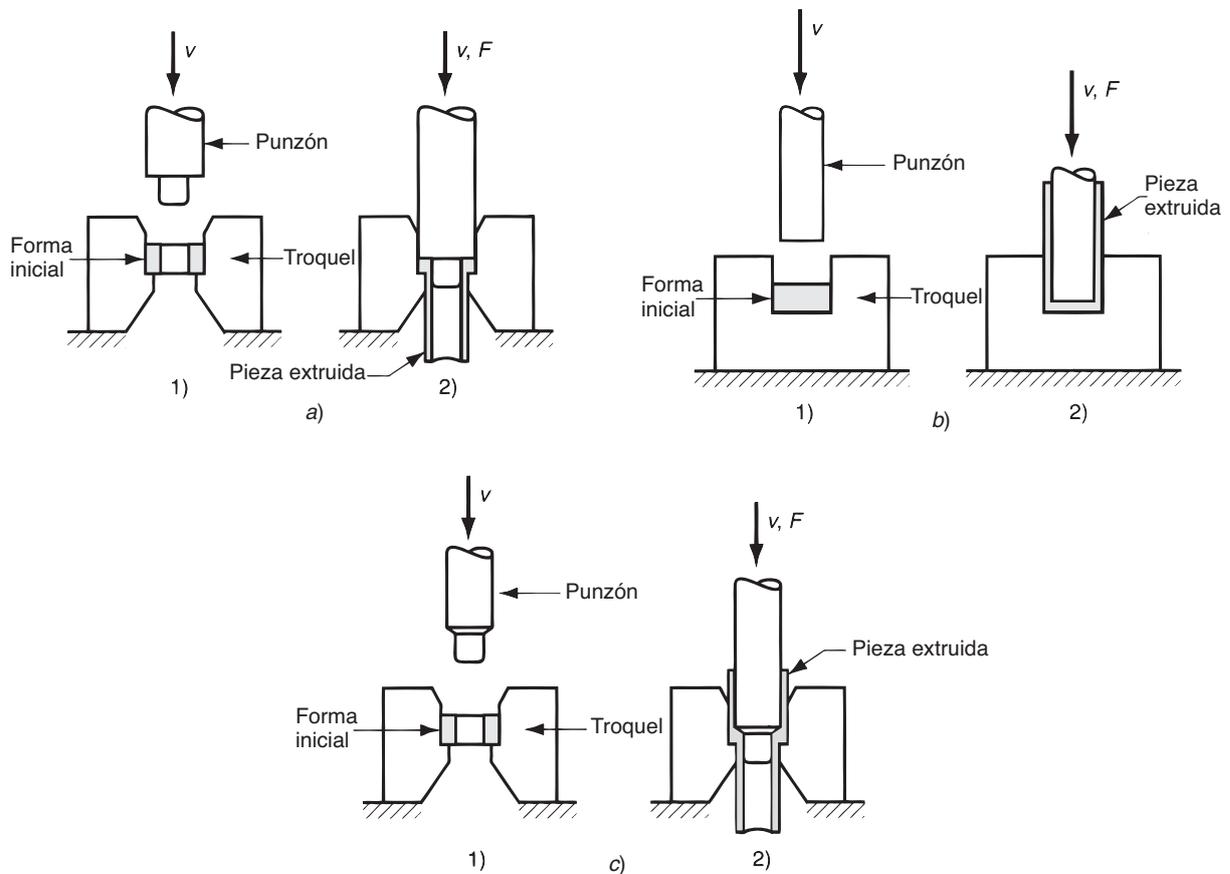


FIGURA 19.37 Varios ejemplos de extrusión por impacto: a) hacia adelante, b) hacia atrás y c) combinación de las dos.

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 adelante, 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.

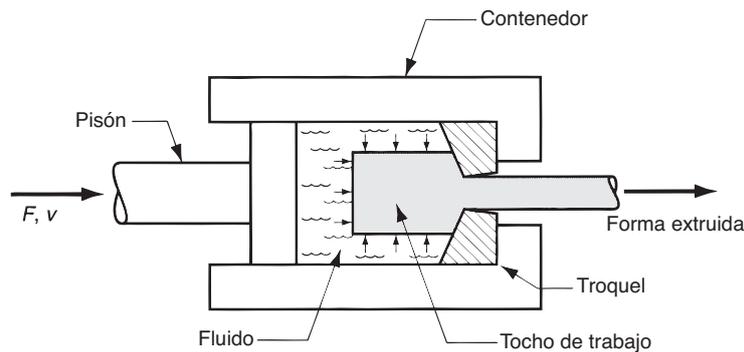


FIGURA 19.38 Extrusión hidrostática.

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

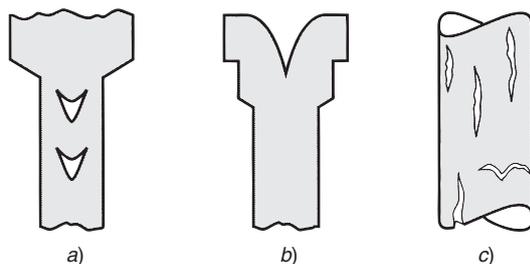


FIGURA 19.39 Algunos defectos comunes en extrusión: a) reventado central, b) tubificación (bolsa de contracción) y c) agrietado superficial.

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.

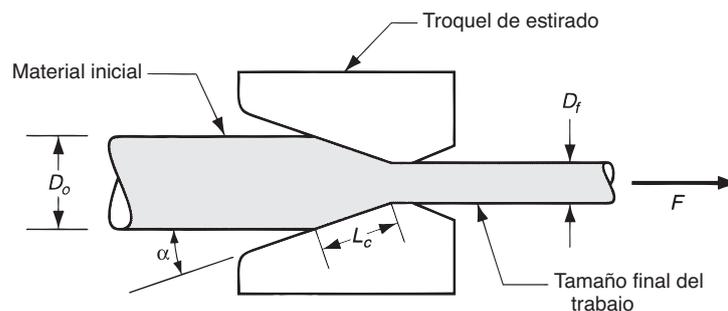
19.6 ESTIRADO DE ALAMBRES Y BARRAS

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, mm^2 (in^2); y A_f = área final, mm^2 (in^2). 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 recalado 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/in^2); 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:

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

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

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 $A_o = 4.91$ mm² y $A_f = 3.14$ mm². 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 armazón 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,

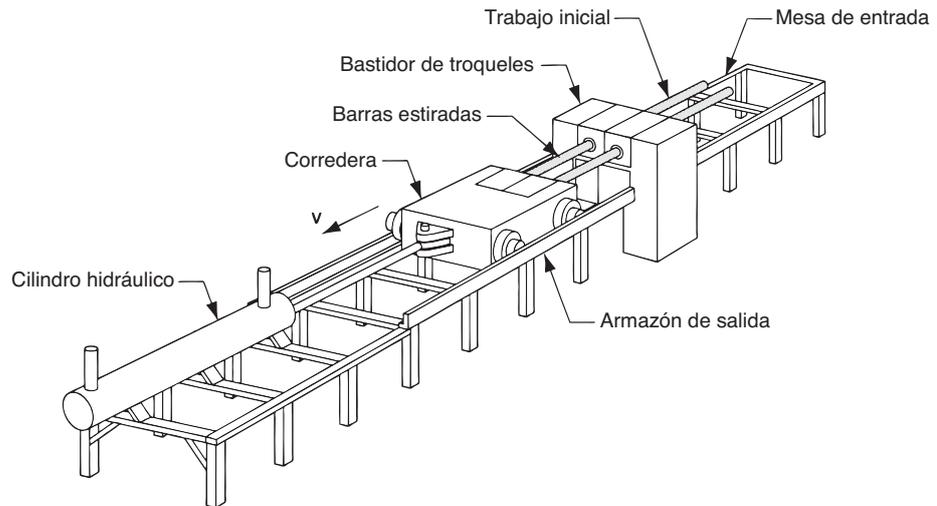
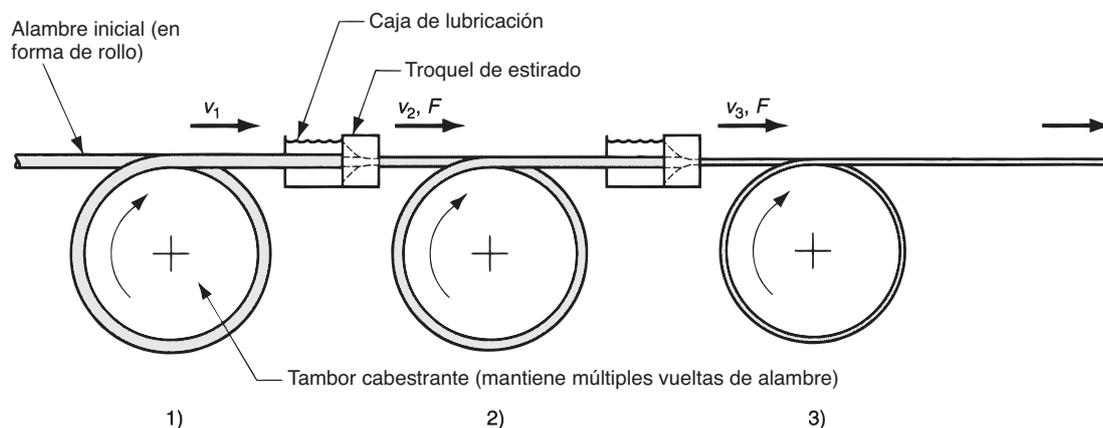


FIGURA 19.41 Banco de estirado operado hidráulicamente para estirado de barras metálicas.

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.



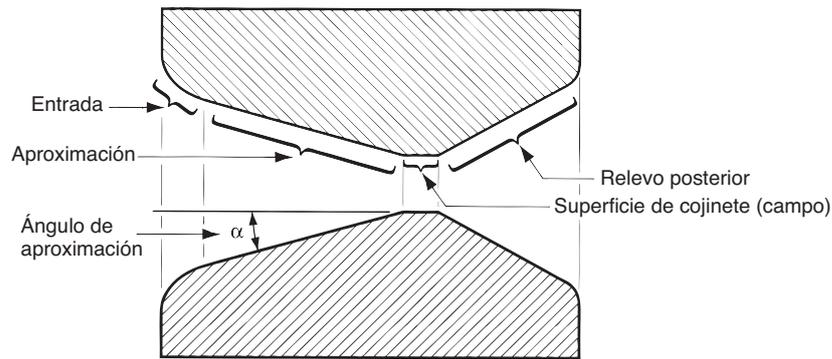


FIGURA 19.43 Troquel de estirado para barras redondas o alambre.

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.

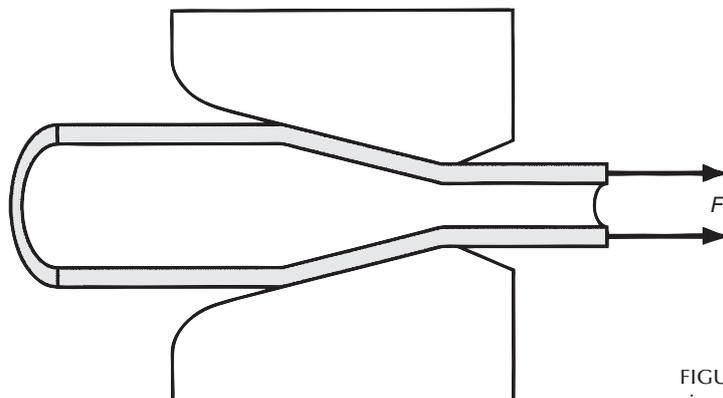


FIGURA 19.44 Estirado de tubos sin mandril (entallado de tubos).

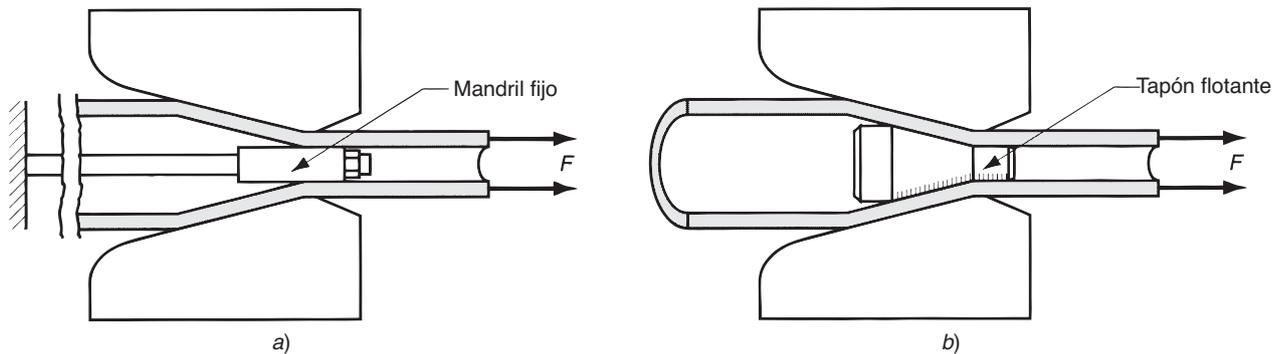


FIGURA 19.45 Estirado de tubos con mandriles: a) mandril fijo y b) tapón flotante.

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.