

# 20

## TRABAJADO METÁLICO DE LÁMINAS

### CONTENIDO DEL CAPÍTULO

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

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

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

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

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

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

---

## 20.1 OPERACIONES DE CORTE

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

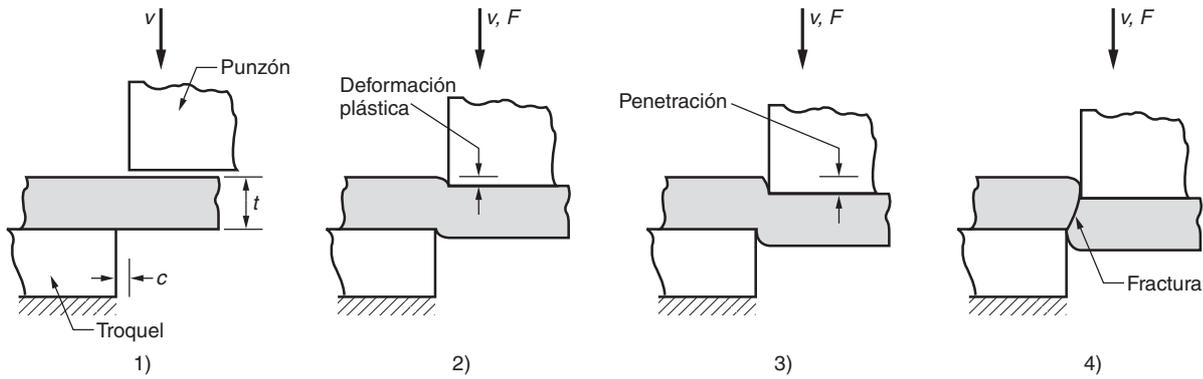


FIGURA 20.1 Cizallado o corte de una lámina metálica entre dos bordes cortantes: 1) inmediatamente antes de que el punzón entre en contacto con el material, 2) el punzón comienza a oprimir el trabajo causando deformación plástica, 3) el punzón comprime y penetra en el trabajo formando una superficie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

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

### 20.1.1 Cizallado, punzonado y perforado

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

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

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

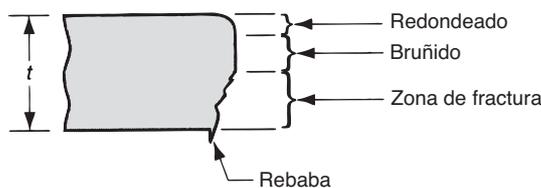


FIGURA 20.2 Bordes cizallados característicos del material de trabajo.

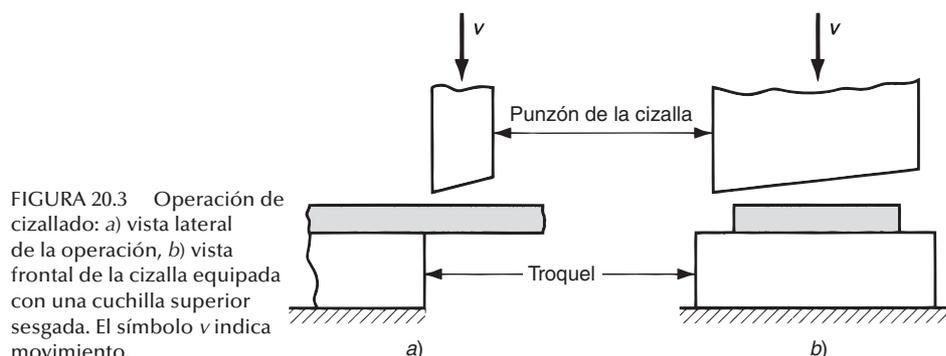


FIGURA 20.3 Operación de cizallado: a) vista lateral de la operación, b) vista frontal de la cizalla equipada con una cuchilla superior sesgada. El símbolo  $v$  indica movimiento.

## 20.1.2 Análisis de ingeniería del corte de láminas metálicas

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

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

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

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

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

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

FIGURA 20.4 a) Punzonado y b) perforado.

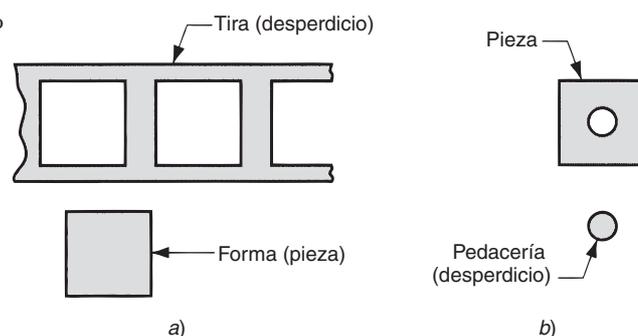
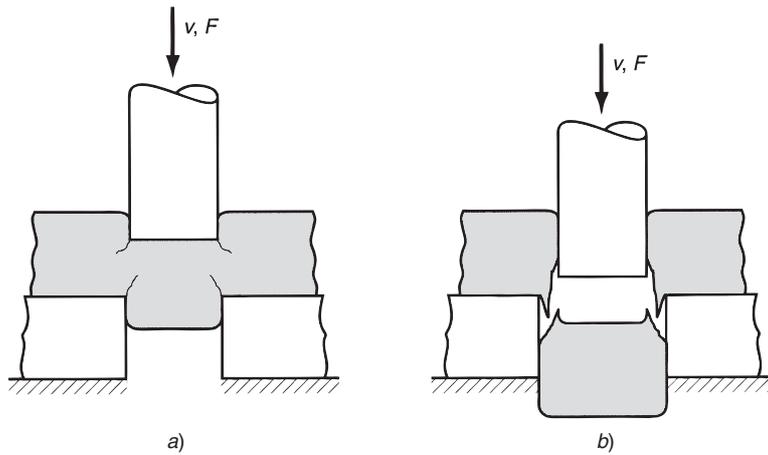


FIGURA 20.5 Efecto del espacio: a) uno demasiado pequeño ocasiona una fractura poco menos que óptima y fuerzas excesivas, b) uno demasiado grande ocasiona rebaba más grande. Los símbolos  $v$  y  $F$  indican movimiento y fuerza aplicada, respectivamente.



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

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

$$\text{Diámetro del troquel de corte de formas} = D_b \quad (20.2b)$$

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

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

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

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

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

$$F = StL \quad (20.4)$$

donde  $S$  = resistencia al corte de la lámina, MPa (lb/in<sup>2</sup>);  $t$  = espesor del material, mm (in) y  $L$  = longitud del borde de corte, mm (in). En el punzonado, perforado, rasurado y operaciones similares,  $L$  es la longitud del perímetro de la forma o agujero que se corta. En la determinación de  $L$  se puede anular el efecto menor del espacio.

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

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

Recopilado de [2].

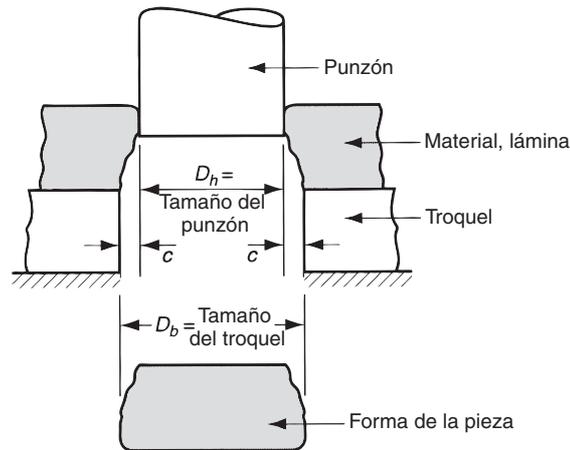


FIGURA 20.6 El tamaño del troquel determina el tamaño de la forma  $D_b$ ; el tamaño del punzón determina el tamaño del agujero  $D_h$ ;  $c$  = Espacio.

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

$$F = 0.7 TS L$$

donde  $TS$  = resistencia última a la tensión, MPa (lb/in<sup>2</sup>).

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

**EJEMPLO 20.1**  
**Espacio en el punzonado y fuerza**

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

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

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

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

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

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

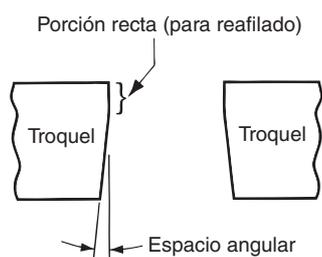


FIGURA 20.7 Espacio angular.

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

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

y la fuerza es:

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

### 20.1.3 Otras operaciones de corte de láminas metálicas

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

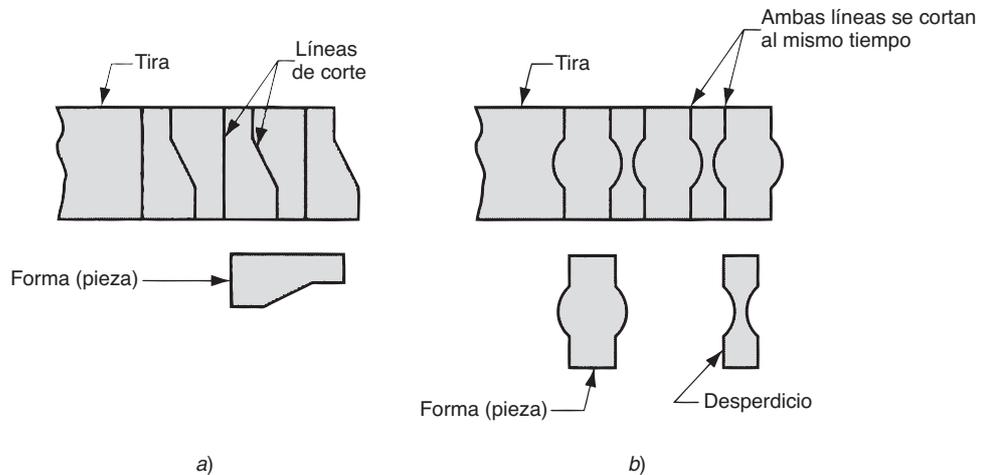
**Corte en trozos y partición** El *corte* en trozos es una operación de corte en el que las piezas se separan de una tira de lámina metálica cortando los troqueles opuestos de la pieza en secuencia, como se muestra en la figura 20.8a). Cada corte produce una nueva pieza. Las características que distinguen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

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

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

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

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



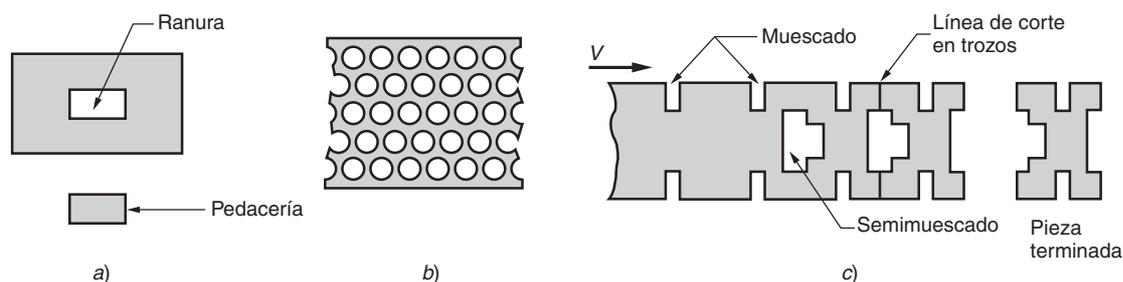


FIGURA 20.9 a) Ranurado, b) perforado múltiple, c) muescado y semimuescado. El símbolo  $v$  indica movimiento de la tira.

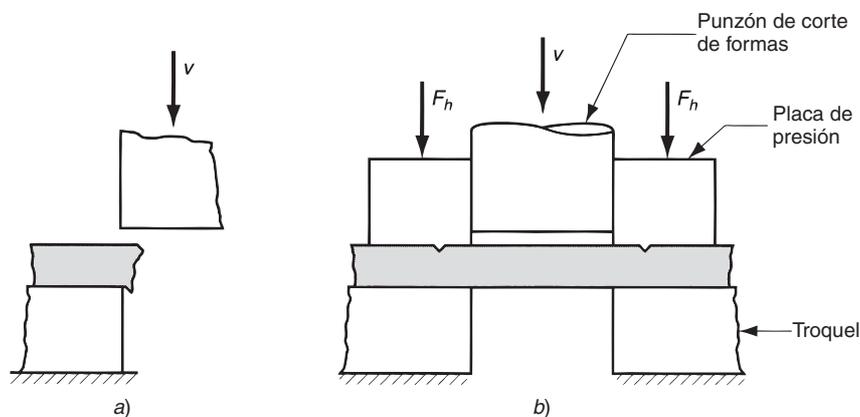
interior de la lámina. Estas operaciones se describen en la figura 20.9c). Al lector le parecerá que el semimuescado es lo mismo que la operación de perforado o ranurado. La diferencia es que el metal removido por el semimuescado crea parte del contorno de la pieza, mientras que el perforado y el ranurado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

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

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

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

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



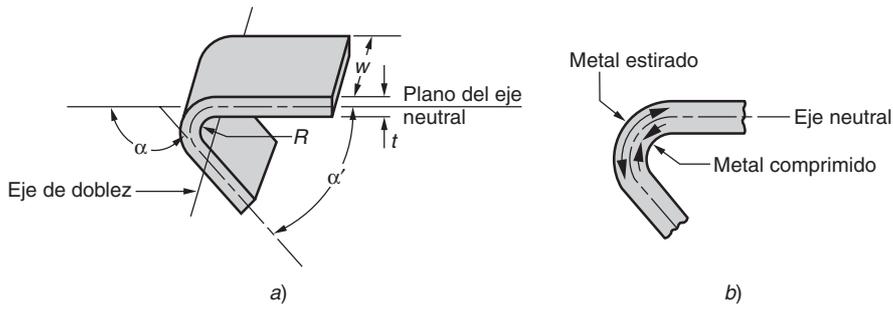


FIGURA 20.11 a) Doblado de lámina metálica; b) en el doblado ocurre elongación a la tensión y a la compresión.

## 20.2 OPERACIONES DE DOBLADO

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

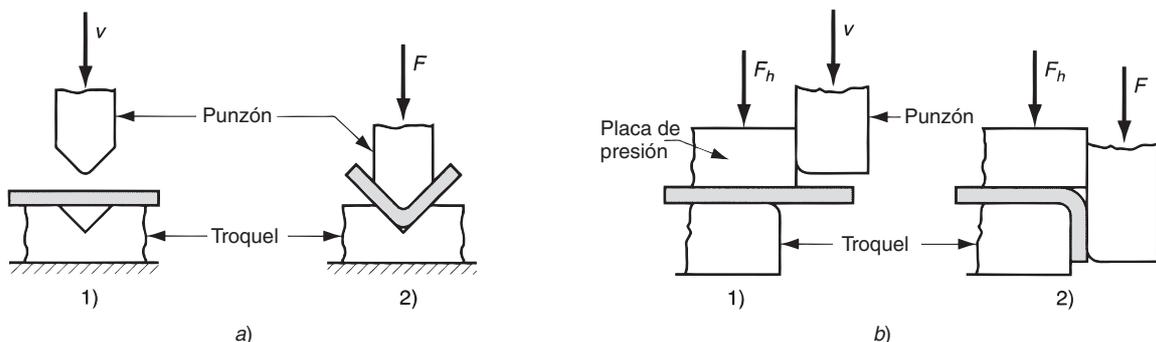
### 20.2.1 Doblado en V y doblado de bordes

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

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

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

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



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

## 20.2.2 Análisis de la ingeniería del doblado

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

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

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

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

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

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

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

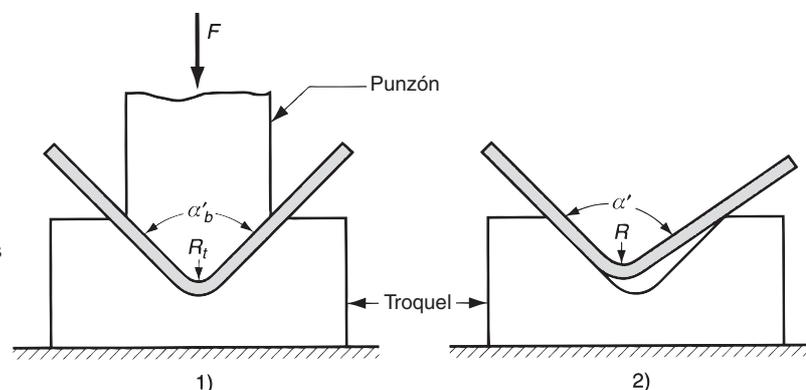
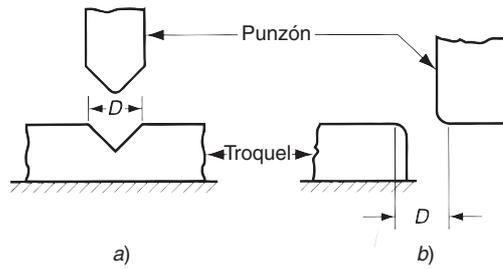


FIGURA 20.14 Dimensión de la abertura del troquel  $D$ : a) troquel en V, y b) troquel deslizante.



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

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

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

$$F = \frac{K_{bf} T S w t^2}{D} \tag{20.8}$$

donde  $F$  = fuerza de doblado, N (lb);  $TS$  = resistencia a la tensión del metal en lámina, MPa (lb/in<sup>2</sup>);  $w$  = ancho de la pieza en la dirección del eje de doblado, mm (in);  $t$  = espesor del material o la pieza, mm (in); y  $D$  = dimensión del troquel abierto en mm (in), como se definió en la figura 20.14, mm (in). En mecánica, la ecuación 20.8 se basa en el doblado de una viga simple, y  $K_{bf}$  es una constante que considera las diferencias encontradas en un proceso real de doblado. Su valor depende del tipo del doblado; para doblado en V,  $K_{bf} = 1.33$ , y para doblado de bordes,  $K_{bf} = 0.33$ .

**EJEMPLO 20.2**  
**Doblado de lámina metálica**

Se dobla una pieza de lámina de metal como se muestra en la figura 20.15. El metal tiene un módulo de elasticidad = 205 (10<sup>3</sup>) MPa, resistencia a la fluencia = 275 MPa y resistencia a la tensión = 450 MPa. Determine a) el tamaño inicial de la pieza y b) la fuerza de doblado, si se usa un troquel en V con una dimensión de abertura del troquel = 25 mm.

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

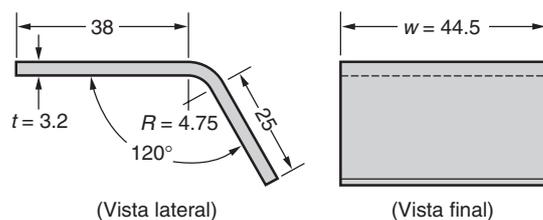


FIGURA 20.15 Pieza de hoja metálica del ejemplo 20.2 (dimensiones en mm).

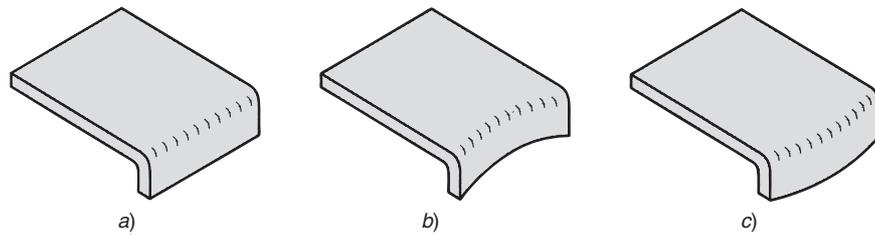


FIGURA 20.16 Formado de bridas: a) bridado recto, b) bridado estirado y c) bridado contraído.

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

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

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

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

$$F = \frac{1.33(450)(44.5)(3.2)^2}{2.5} = 10909 \text{ N}$$

### 20.2.3 Otras operaciones de doblado y operaciones relacionadas con el formado

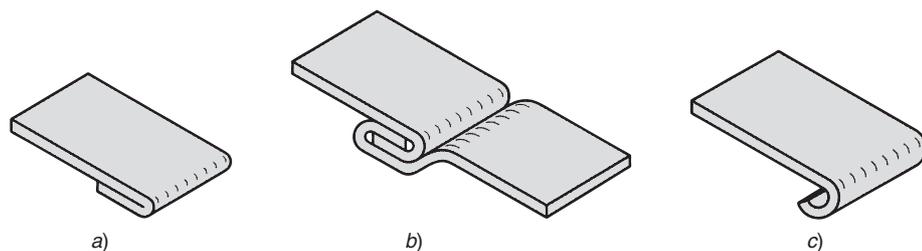
Se dispone de otras operaciones de doblado adicional, además de las de doblado en V y doblado de bordes. Algunas de éstas involucran el doblado sobre ejes curvos en lugar de ejes rectos, o tienen otras características que se diferencian de las operaciones básicas descritas anteriormente.

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

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

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

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



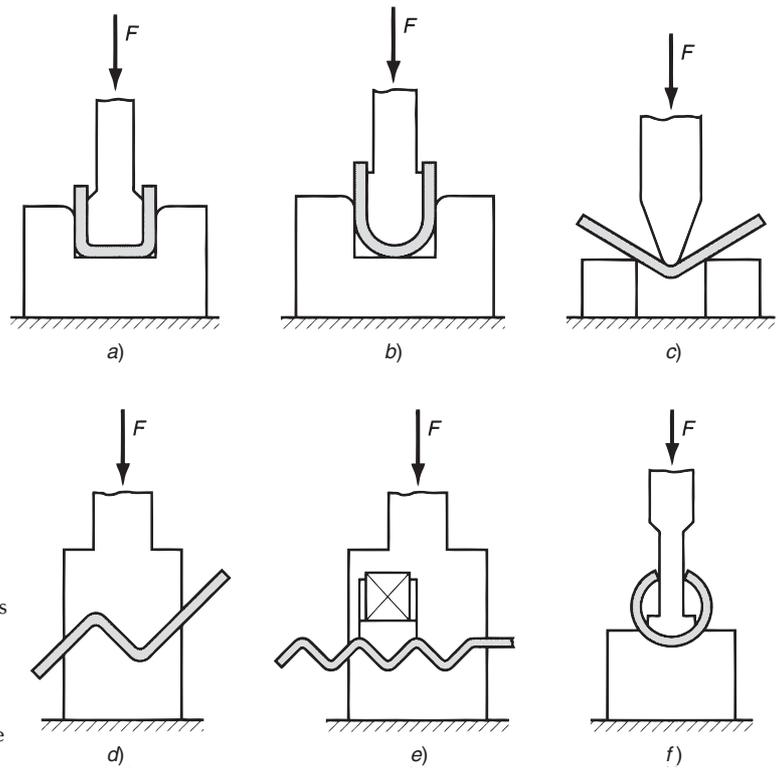


FIGURA 20.18 Operaciones misceláneas de doblado: a) doblado en canal, b) doblado en U, c) doblado al aire, d) doblado escalonado, e) corrugado y f) formado de tubo.  $F$  = fuerza aplicada.

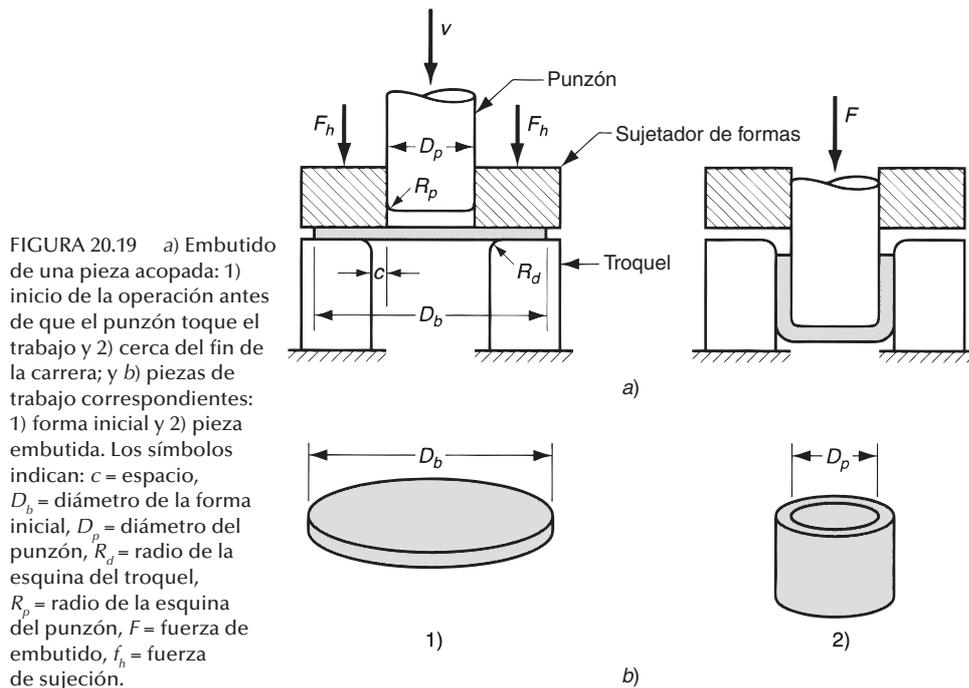
**Operaciones misceláneas de doblado** En la figura 20.18 se muestran algunas otras operaciones de doblado para ilustrar varias formas en las que se puede doblar una lámina. La mayoría de estas operaciones se realiza en troqueles relativamente simples y similares a los troqueles en V.

### 20.3 EMBUTIDO

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

#### 20.3.1 Mecánica del embutido

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



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

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

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

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

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

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

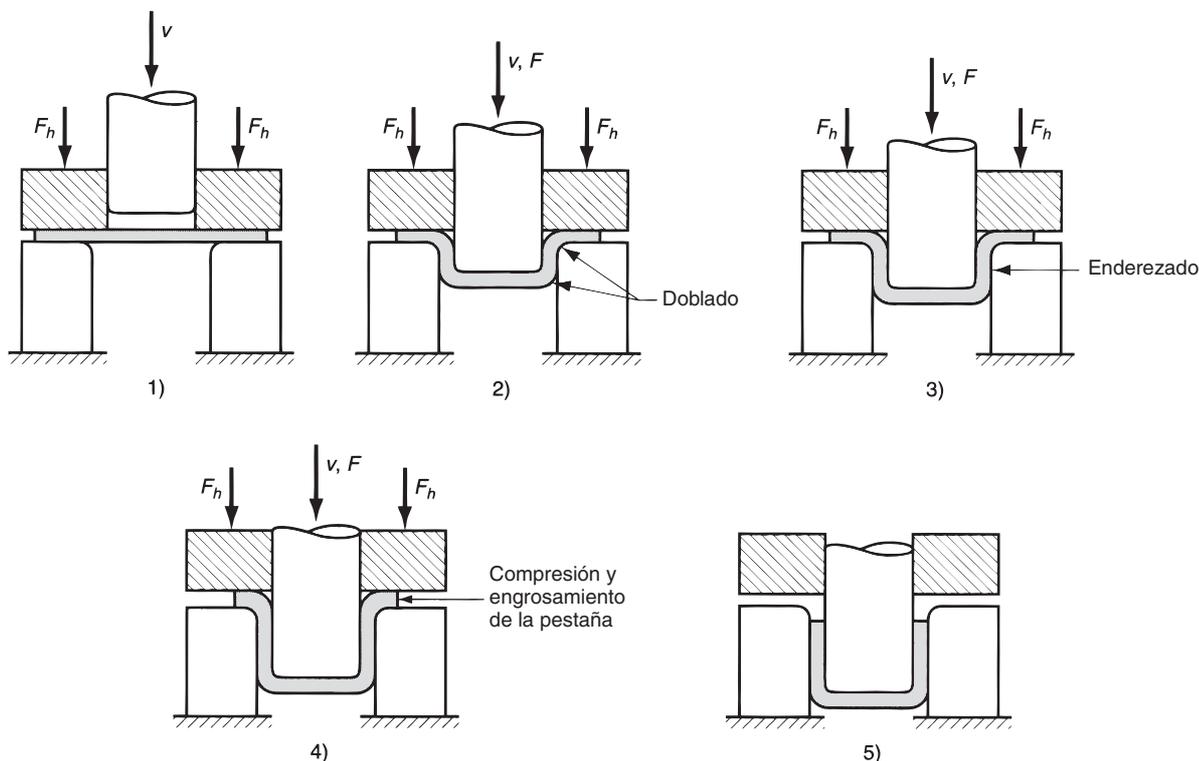


FIGURA 20.20 Etapas en la deformación del material de trabajo en el embutido profundo: 1) el punzón entra en contacto con el trabajo, 2) doblado, 3) enderezado, 4) fricción y compresión, y 5) forma final de copa, que muestra los efectos del adelgazamiento en las paredes de la copa. Los símbolos indican: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

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

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

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

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

### 20.3.2 Análisis de ingeniería del embutido

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### EJEMPLO 20.3 Embutido acopado

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

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

$$DR = 138 / 75 = 1.84$$

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

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

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

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

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

donde  $F$  = fuerza de embutido, N (lb);  $t$  = espesor original de la forma, mm (in);  $TS$  = resistencia a la tensión, MPa (lb/in<sup>2</sup>); y  $D_b$  y  $D_p$  son los diámetros de la forma inicial y del punzón, respectivamente, en mm (in). La constante 0.7 es un factor de corrección para la fricción. La ecuación 20.12 estima la fuerza máxima en la operación. La fuerza de embutido varía a través del movimiento hacia abajo del punzón, alcanzando usualmente su valor máximo a una tercera parte de la longitud de la carrera.

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

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

donde  $F_h$  = fuerza de sujeción en embutido, N (lb);  $Y$  = resistencia a la fluencia de la lámina de metal, MPa (lb/in<sup>2</sup>);  $t$  = espesor inicial del material, mm (in);  $R_d$  = radio de la esquina del troquel, mm (in); los demás términos se definieron antes. La fuerza de sujeción es de manera usual una tercera parte, aproximadamente, de la fuerza o embutido [8].

#### EJEMPLO 20.4 Fuerzas en el embutido

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

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

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

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

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

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

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

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

### 20.3.3 Otras operaciones de embutido

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

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

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

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

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

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

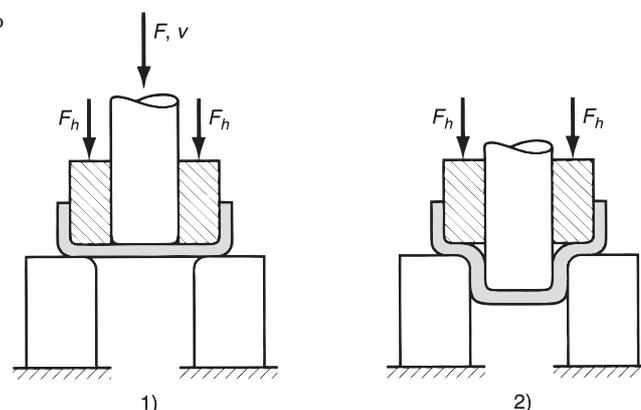
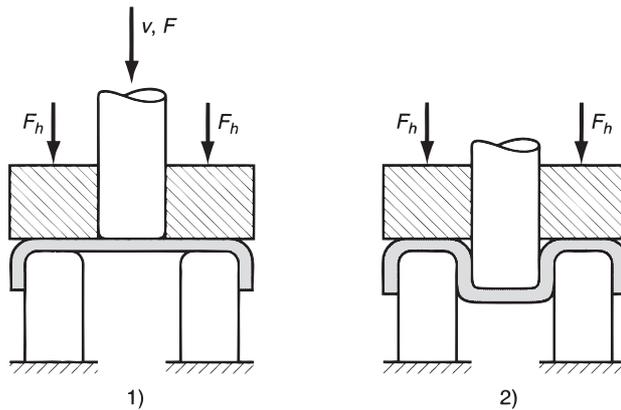


FIGURA 20.22 Embutido inverso: 1) inicio y 2) terminación. Símbolos  $v$  = velocidad del punzón,  $F$  = fuerza aplicada por el punzón,  $F_h$  = fuerza del sujetador de formas.



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

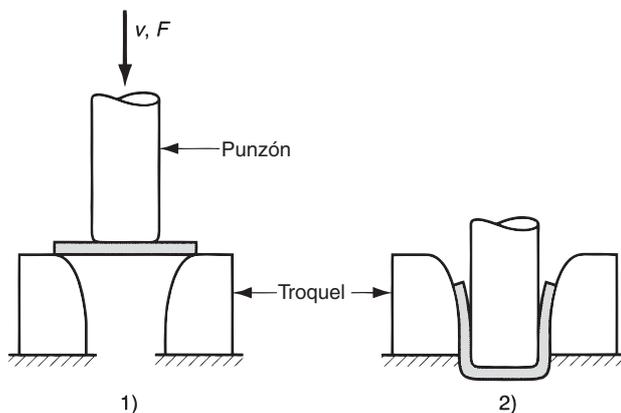
$$D_b - D_p < 5t \tag{20.14}$$

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

### 20.3.4 Defectos del embutido

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

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



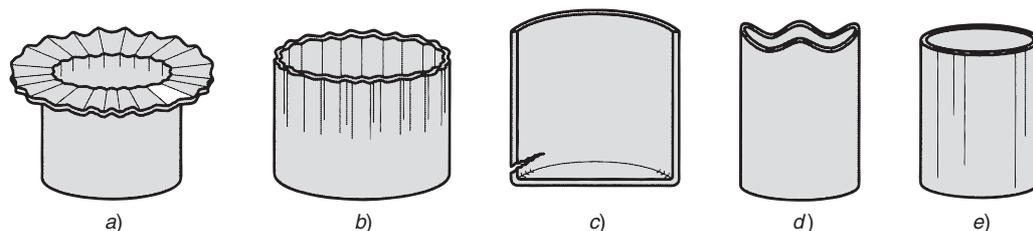


FIGURA 20.24 Defectos comunes en las piezas embutidas a) el arrugamiento puede ocurrir en la pestaña o b) en la pared, c) desgarramiento, d) orejeado y e) rayados superficiales.

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

## 20.4 OTRAS OPERACIONES DE FORMADO DE LÁMINAS METÁLICAS

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

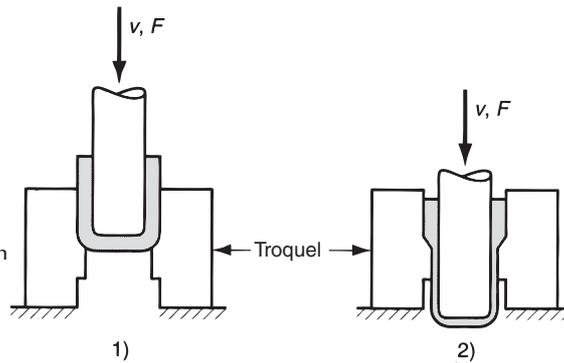
### 20.4.1 Operaciones realizadas con herramientas metálicas.

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

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

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

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



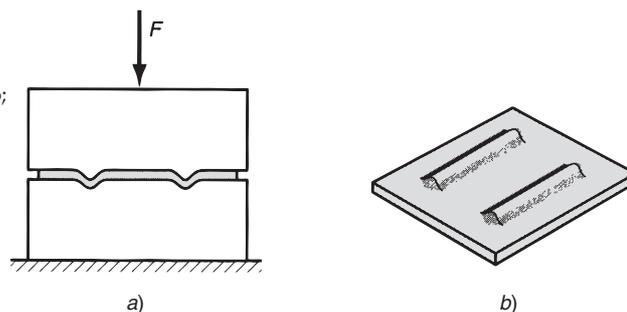
**Acuñado y estampado** El acuñado es una operación de deformación volumétrica que se analizó en el capítulo anterior; se usa con mucha frecuencia en el trabajo de láminas metálicas para formar indentaciones y secciones levantadas de la pieza. La indentación produce adelgazamiento de la lámina metálica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

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

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

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

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



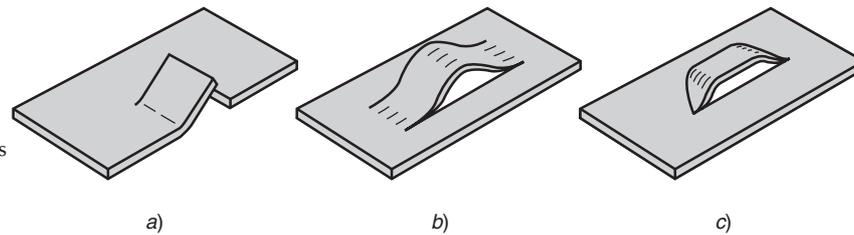


FIGURA 20.27 Varias formas de desplegado: a) corte y doblez; b) y c) dos tipos de corte y formado.

## 20.4.2 Procesos de formado con caucho

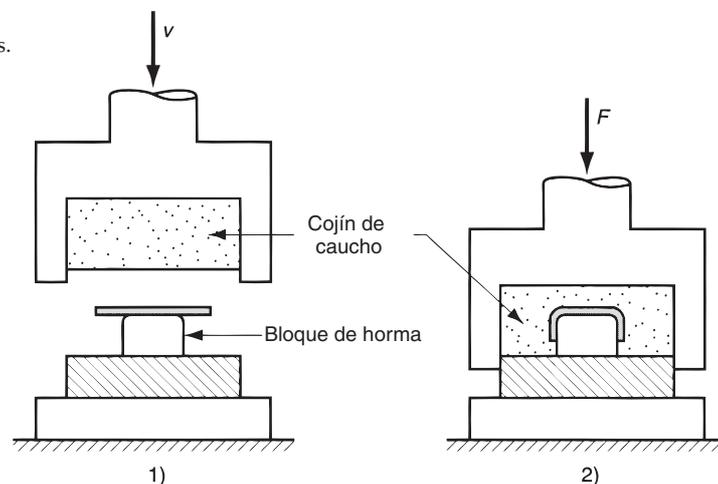
Las dos operaciones analizadas en esta sección se realizan en prensas convencionales, pero las herramientas son inusuales porque usan un elemento flexible (hecho de caucho o material similar) para efectuar la operación de formado. Las operaciones son: 1) el proceso Guerín y 2) el hidroformado.

**Proceso Guerín** El *proceso Guerín* usa un cojín de caucho grueso (u otro material flexible) para formar la lámina de metal sobre un bloque de forma positiva como se muestra en la figura 20.28. El cojín de caucho está confinado en un recipiente de acero. Al descender el punzón, el caucho rodea gradualmente la lámina, aplicando presión para deformarla y forzarla a tomar la forma del bloque. Este proceso se limita a formas poco profundas relativamente, ya que las presiones generadas por el caucho, de hasta 10 MPa (1 500 lb/in<sup>2</sup>), no son suficientes para evitar el arrugado de formas más profundas.

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

**Hidroformado** El *hidroformado* es similar al proceso Guerín. La diferencia es que se sustituye el cojín grueso de caucho por un diafragma de caucho lleno con un fluido hidráulico, como se ilustra en la figura 20.29. Esto permite aumentar la presión que forma la parte de trabajo, hasta cerca de 100 MPa (15 000 lb/in<sup>2</sup>), previniendo así el arrugado en piezas profundas. De

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



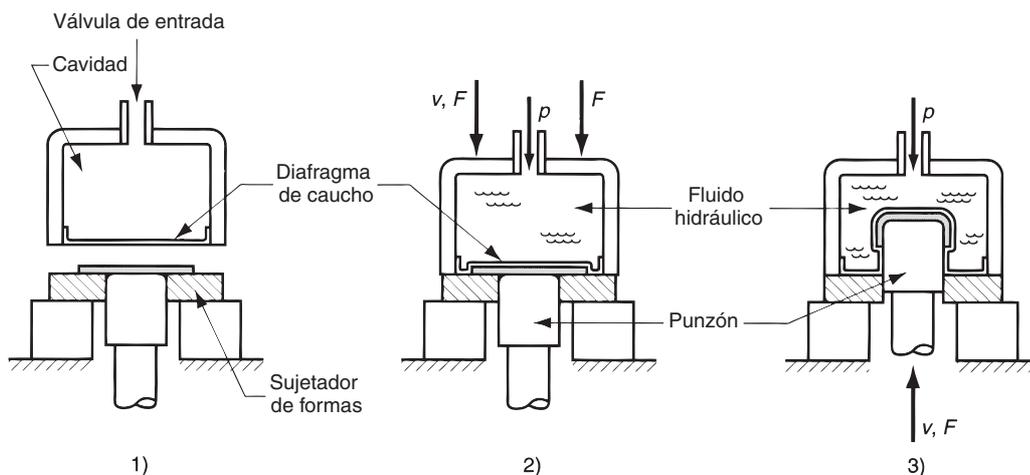


FIGURA 20.29 Proceso de hidroformado 1) inicio, no hay fluido en la cavidad; 2) prensa cerrada, cavidad con fluido a presión; 3) el punzón presiona sobre el trabajo para formar la pieza. Los símbolos indican  $v$  = velocidad,  $F$  = fuerza aplicada y  $p$  = presión hidráulica.

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

## 20.5 TROQUELES Y PRENSAS PARA PROCESOS CON LÁMINAS METÁLICAS

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

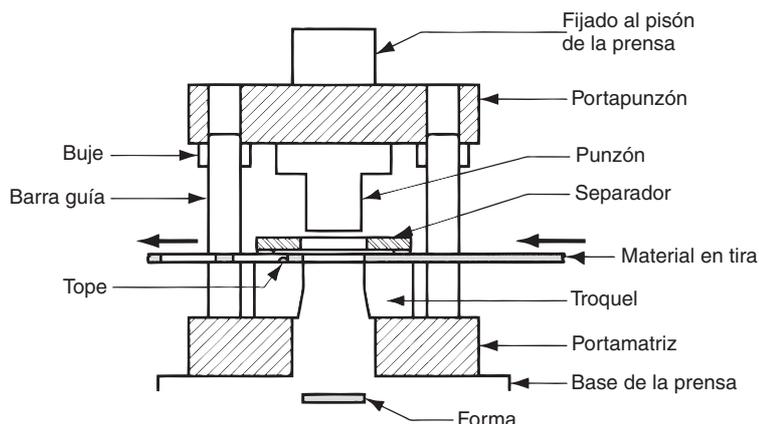
### 20.5.1 Troqueles

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

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

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

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



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

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

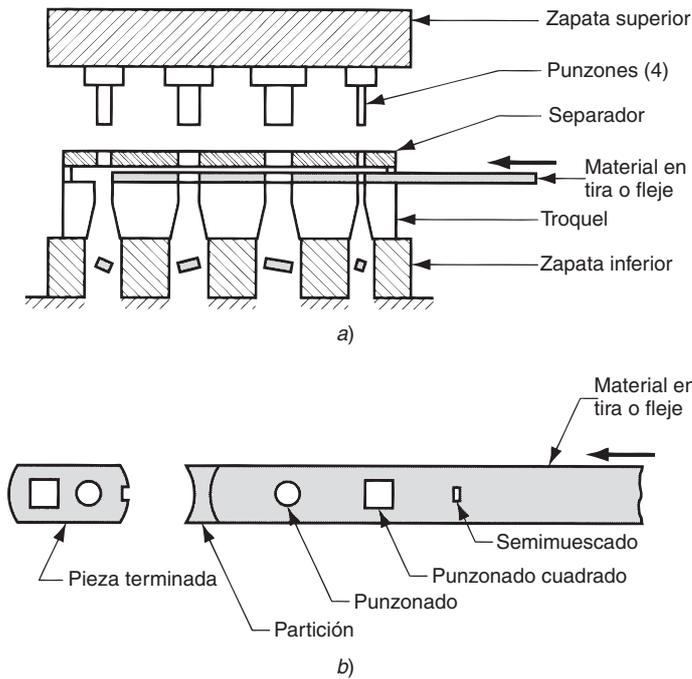
Hay otros componentes de los troqueles para prensado; la descripción precedente sólo proporciona una introducción a la terminología.

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

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

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

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



## 20.5.2 Prensas

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

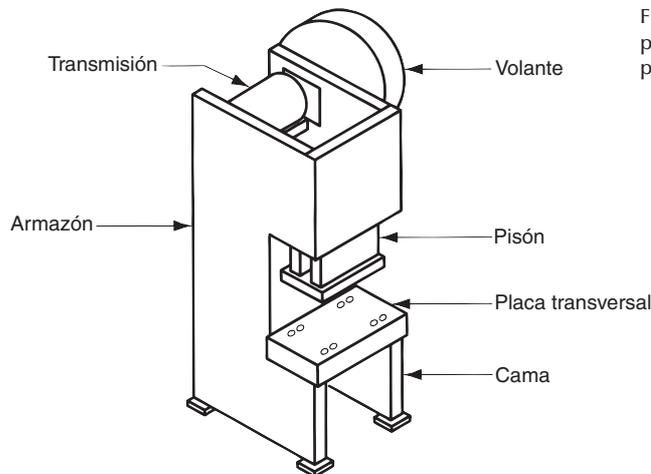


FIGURA 20.32 Componentes de una prensa troqueladora típica accionada por transmisión mecánica.

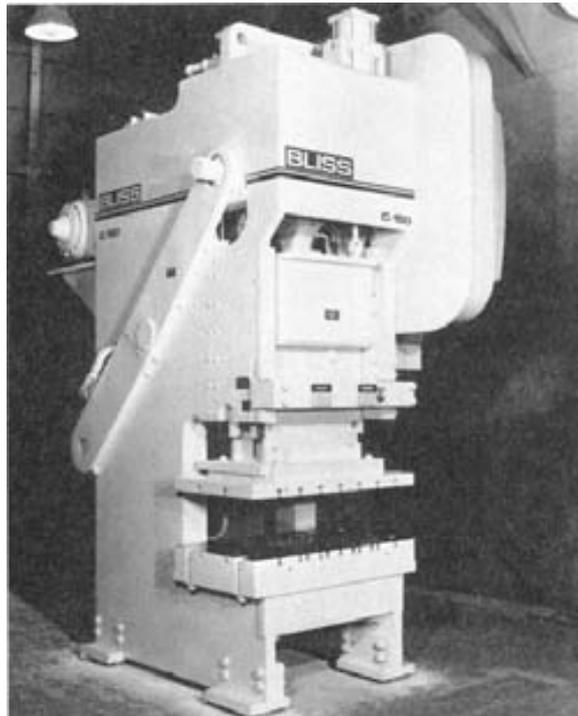
Hay prensas de varias capacidades, sistemas de potencia y tipos de armazón. La capacidad de una prensa es su disposición para manejar la fuerza y energía requerida para realizar las operaciones de troquelado. Ésta se determina por su tamaño físico y por sus sistemas de potencia. El sistema de potencia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

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

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

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

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



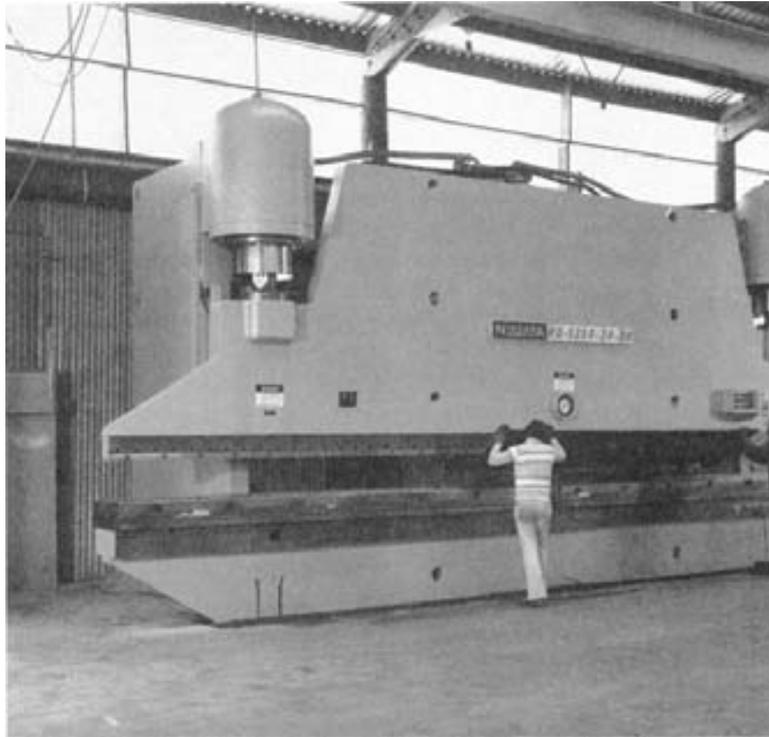


FIGURA 20.34 Prensa plegadora con un ancho de cama de 9.15 m (30 ft) y capacidad de 11 200 kN (1 250 tons); se muestra a dos trabajadores que posicionan una placa para doblar (fotografía por cortesía de Niagara Machine & Tools Works).

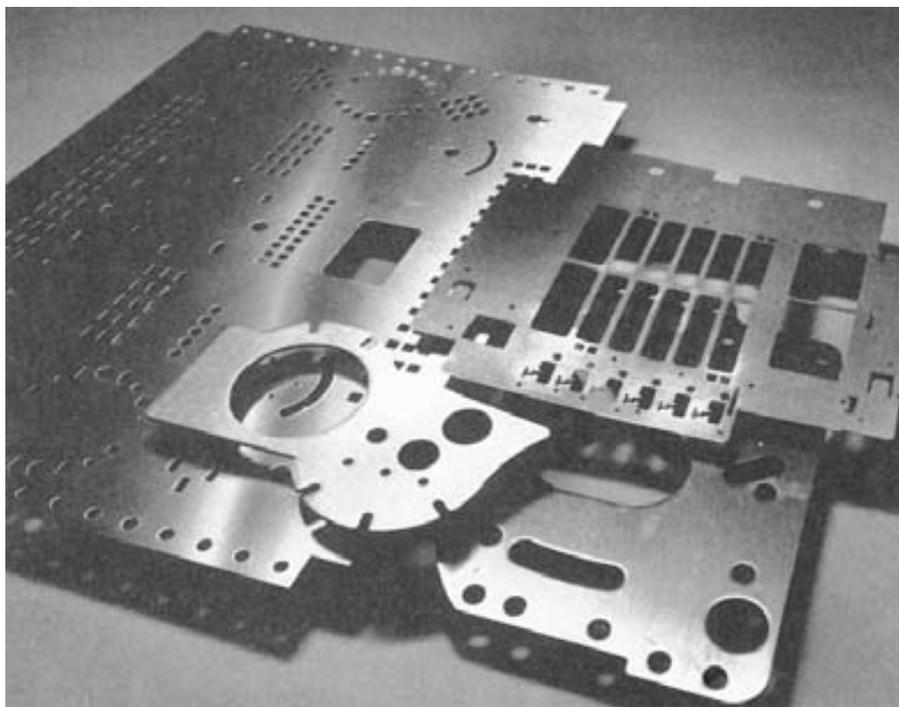


FIGURA 20.35 Varias piezas de lámina producidas en una prensa de torreta; en ellas se muestra la variedad de formas posibles de agujeros (fotografía cortesía de Strippet, Inc.).

www.elsolucionario.net

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

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

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

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

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

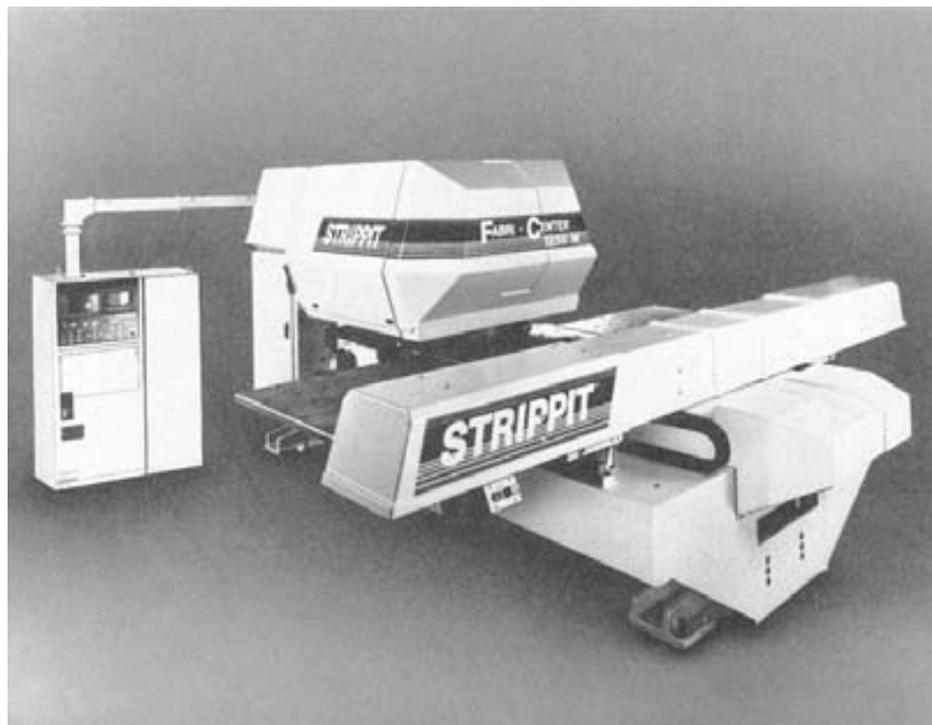


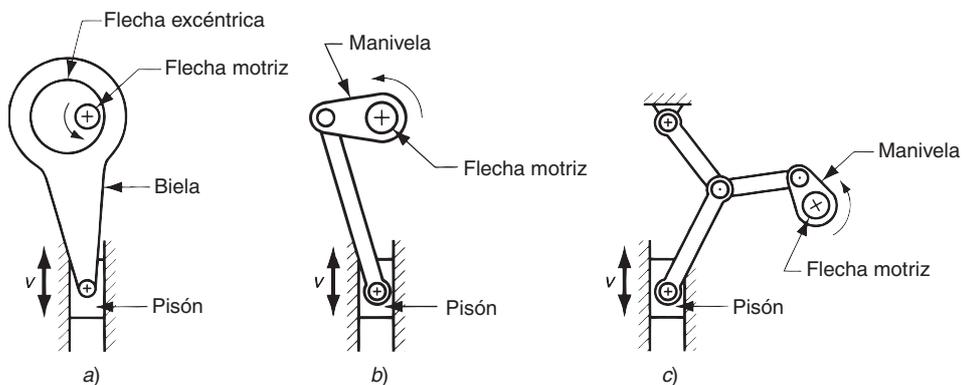
FIGURA 20.37 Prensa con armazón de lados rectos (fotografía por cortesía de Greenerd Press & Machine Company, Inc.).



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

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

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



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

## 20.6 OPERACIONES CON LÁMINAS METÁLICAS NO REALIZADAS EN PRENSAS

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

### 20.6.1 Formado por estirado

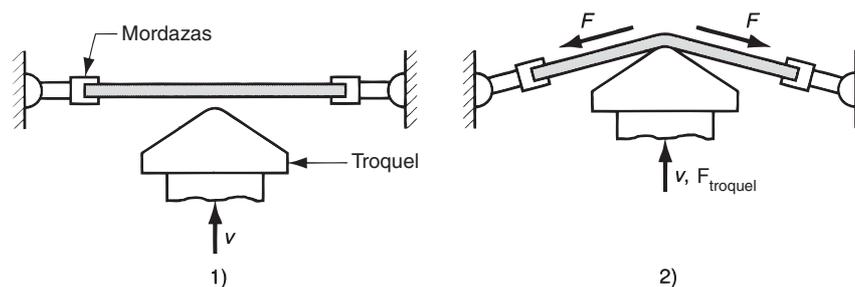
El **formado por estirado** es un proceso de deformación de láminas metálicas en el cual la lámina se restira en forma intencional y dobla simultáneamente a fin de lograr un cambio de forma. El proceso se ilustra en la figura 20.39 para un doblado gradual relativamente simple. La pieza de trabajo se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

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

donde  $F$  = fuerza de estiramiento, N (lb);  $L$  = longitud de la lámina en dirección perpendicular al estiramiento, mm (in);  $t$  = espesor instantáneo del material, mm (in); y  $Y_f$  = esfuerzo de fluencia del metal del trabajo, MPa (lb/in<sup>2</sup>). La fuerza del troquel  $F_{\text{troquel}}$ , mostrado en la figura, puede determinarse balanceando los componentes verticales de la fuerza.

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

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



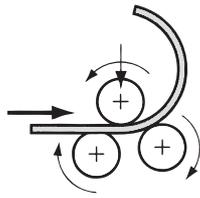


FIGURA 20.40 Doblado con rodillos.

### 20.6.2 Doblado y formado con rodillos

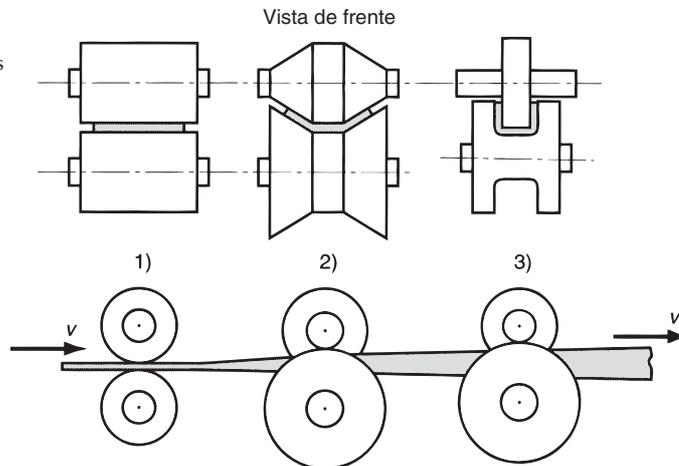
En las operaciones descritas en esta sección se usan rodillos para formar láminas metálicas. El **doblado con rodillos** es una operación en la cual generalmente se forman piezas grandes de lámina metálica en secciones curvas por medio de rodillos. En la figura 20.40 se muestra un arreglo posible de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

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

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

www.elsolucionario.net

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



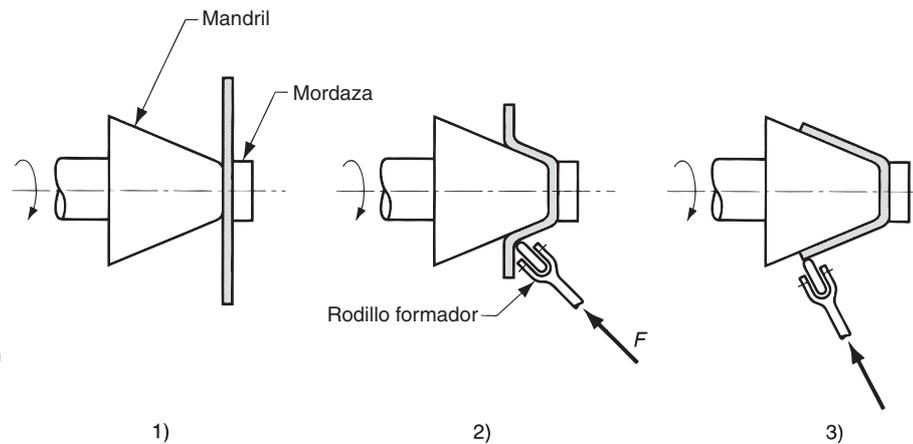


FIGURA 20.42 Rechazado convencional: 1) disposición al iniciar el proceso, 2) durante el rechazado y 3) proceso completo.

### 20.6.3 Rechazado

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

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

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

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

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

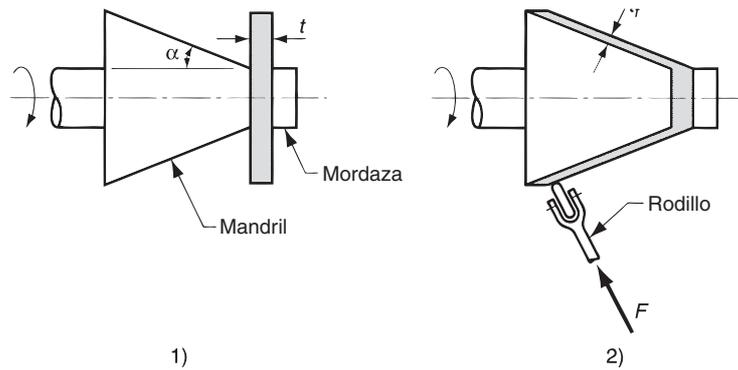


FIGURA 20.43 Rechazo cortante: 1) disposición y 2) proceso terminado.

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

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

$$t_f = t \operatorname{sen} \alpha \quad (20.16)$$

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

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

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

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

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

#### 20.6.4 Formado por alta velocidad de energía

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

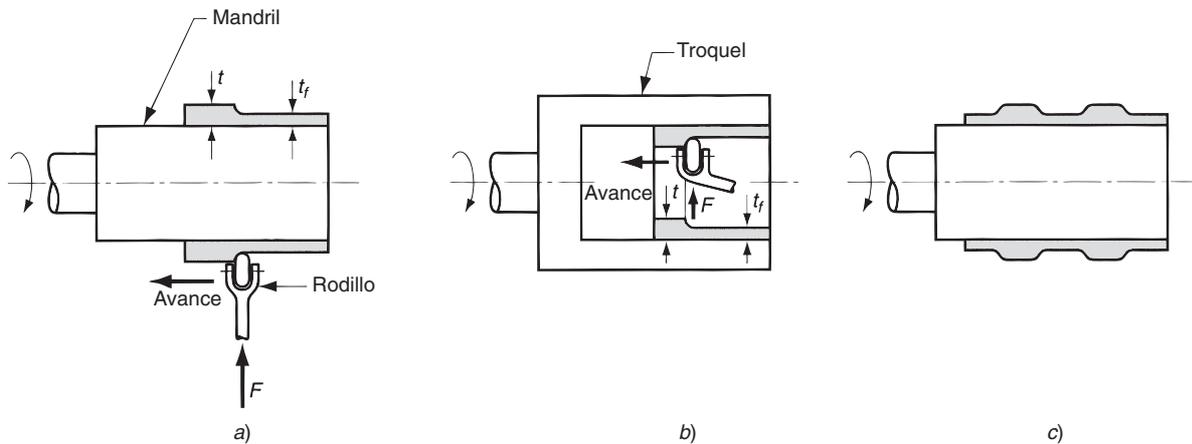
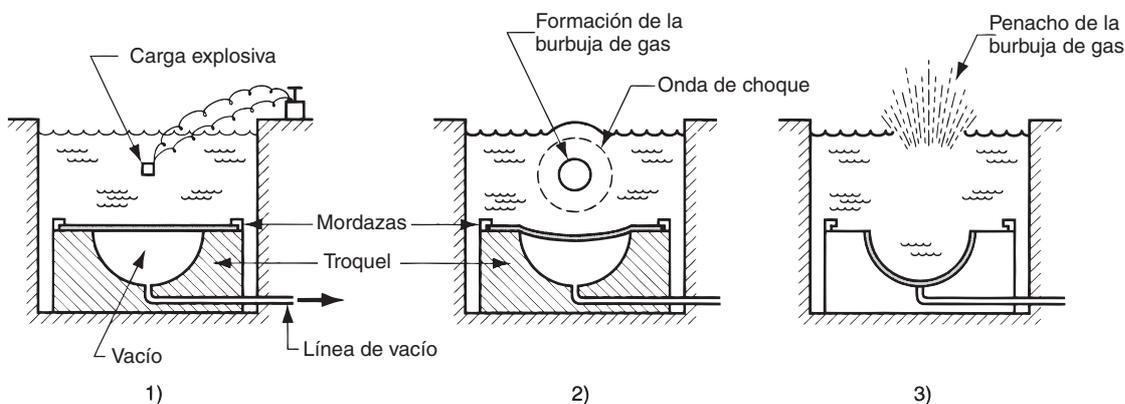


FIGURA 20.44 Rechazo de tubos: a) externo, b) interno y c) perfilado.

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

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

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



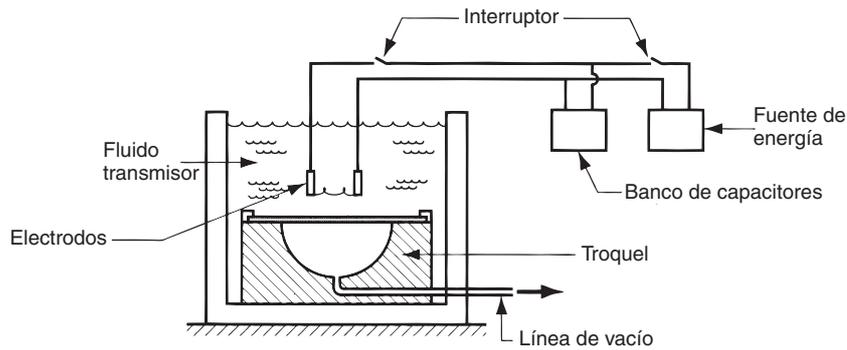


FIGURA 20.46 Disposición del formado electrohidráulico.

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

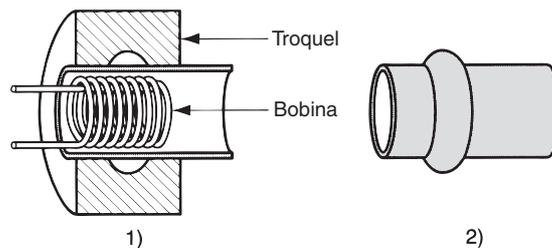
**Formado electromagnético** El *formado electromagnético*, también llamado *formado de pulso magnético*, es un proceso en el cual la lámina metálica se deforma por la fuerza mecánica de un campo electromagnético inducido en la pieza de trabajo por una bobina electrificada. La bobina está electrificada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

## 20.7 DOBLADO DE MATERIAL TUBULAR

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

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

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



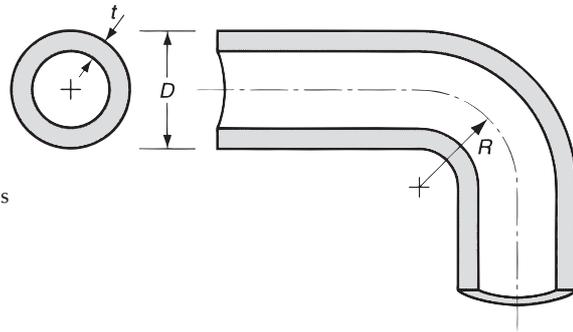
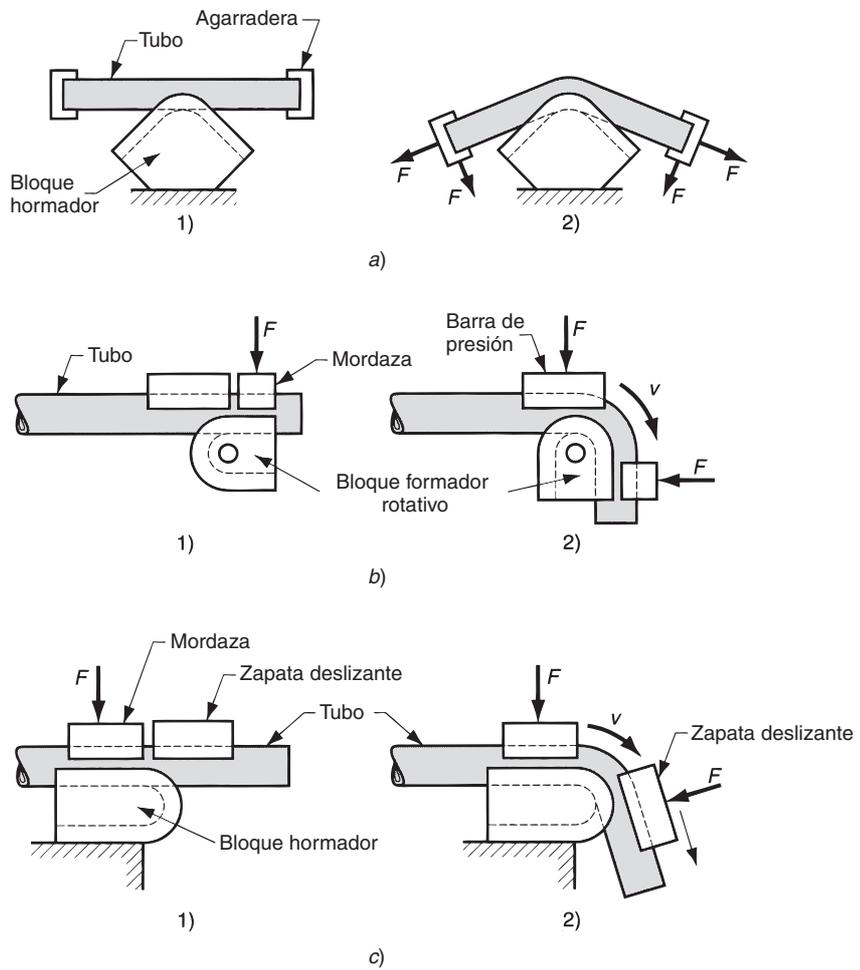


FIGURA 20.48 Dimensiones y términos en el doblado de tubos:  $D$  = diámetro exterior del tubo,  $R$  = radio de doblado y  $t$  = espesor de la pared.

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



www.elsolucionario.net

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

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

## REFERENCIAS

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

## PREGUNTAS DE REPASO

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