

### 3.2.2. FORJADO

El forjado es un proceso de deformación en el cual el material se comprime entre los dados, usando impacto o presión gradual para formar la parte. Es la operación más antigua para formado de metales y se remonta quizá al año 5000 a.C. En la actualidad el forjado es un proceso industrial importante, mediante el cual se hacen una variedad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones, la industria del acero y de otros metales básicos usa el forjado para fijar la forma básica de grandes componentes que luego se maquinan para lograr su forma final y dimensiones definitivas.

Una manera de clasificar las operaciones de forja es mediante la temperatura de trabajo. La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente (por arriba y por debajo de la temperatura de recristalización), dada la demanda de deformación que el proceso requiere y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo, sin embargo, el forjado en frío también es muy común para ciertos productos. La ventaja del forjado en frío es la mayor resistencia que adquiere el material, que resulta del endurecimiento por deformación.

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

Otra diferencia, entre las operaciones de forjado es el grado en que los dados restringen el flujo del metal de trabajo. Atendiendo a esta clasificación, hay tres tipos de operaciones de forjado: a) forjado en dado abierto, b) forjado en dado impresor y c) forjado sin rebaba.

#### 3.2.2.1. Forjado en dado abierto

El caso más simple de forjado consiste en comprimir una parte de sección cilíndrica entre dos dados planos, muy semejante a un ensayo de la compresión. Esta operación de forjado se conoce como recalado o forjado para recalcar, reduce la altura de material de trabajo e incrementa su diámetro.

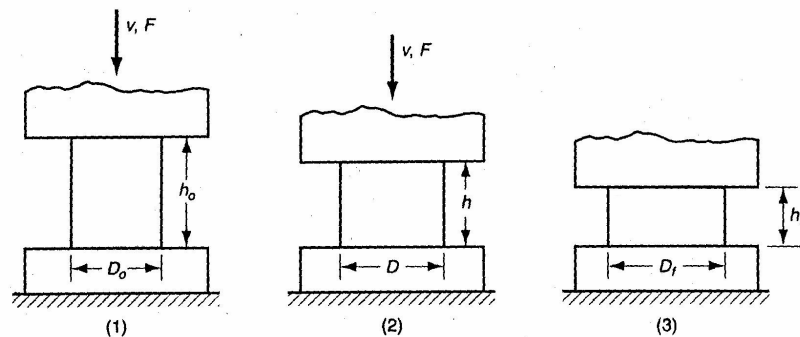


FIGURA 3.16 Deformación homogénea de una parte de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales en una operación de forjado en dado abierto: (1) inicio del proceso con la parte de trabajo a su altura y diámetros originales, (2) compresión parcial y (3) tamaño final.

**Análisis del Forjado en Dado Abierto** Si el forjado en dado abierto se lleva a cabo bajo condiciones ideales, sin fricción entre el material de trabajo y la superficie del dado, ocurre una deformación homogénea y el flujo radial de material es uniforme a lo largo de su altura como se representa en la figura 3.16. Bajo condiciones ideales, el esfuerzo real que experimenta el material durante el proceso, se puede determinar por:

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h} \quad (3.19)$$

Donde

$h_0$  = altura inicial del trabajo, (mm); y

$h$  = altura de un punto intermedio en el proceso (mm)

Al final de la carrera de compresión,  $h = h_f$  (su valor final) y el esfuerzo real alcanza su máximo valor.

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

$$F = Y_f A \quad (3.20)$$

Donde

$F$  = fuerza, (N);

$A$  = área de la sección transversal de la parte, ( $\text{mm}^2$ );

$Y_f$  = esfuerzo de fluencia correspondiente al esfuerzo dado por la ecuación 3.19, (MPa).

El área  $A$  se incrementa continuamente al reducirse la altura  $h$  durante la operación. El esfuerzo de fluencia  $Y_f$  se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo, excepto cuando el metal es perfectamente plástico (trabajo en caliente). En este caso, el exponente de endurecimiento por deformación  $n = 0$ , y el esfuerzo de fluencia  $Y_f$  iguala al esfuerzo de fluencia del metal  $Y$ . La fuerza alcanza un valor máximo al final de la carrera de forjado, donde el área y el esfuerzo de fluencia llegan a su valor más alto.

Una operación real de recalado no ocurre exactamente como se muestra en la figura 3.16, debido a que la fricción en la superficie de los dados se opone al flujo de metal. Esto crea un efecto de abultamiento en forma de barril, llamado abarrilamiento, que se muestra en la figura 3.17. Cuando se realiza un trabajo en caliente con dados fríos, el abarrilamiento es más pronunciado. Esto se debe a: 1) un coeficiente de fricción más alto, típico del trabajo en caliente y 2) la transferencia de calor en la superficie del dado y sus cercanías, lo cual enfría el metal y aumenta su resistencia a la deformación. El metal más caliente se encuentra en medio de la parte y fluye más fácilmente que el metal más frío de los extremos. El efecto se acentúa al aumentar la relación entre el diámetro y la altura de la parte, debido a la mayor área de contacto en la interfase dado - material de trabajo.

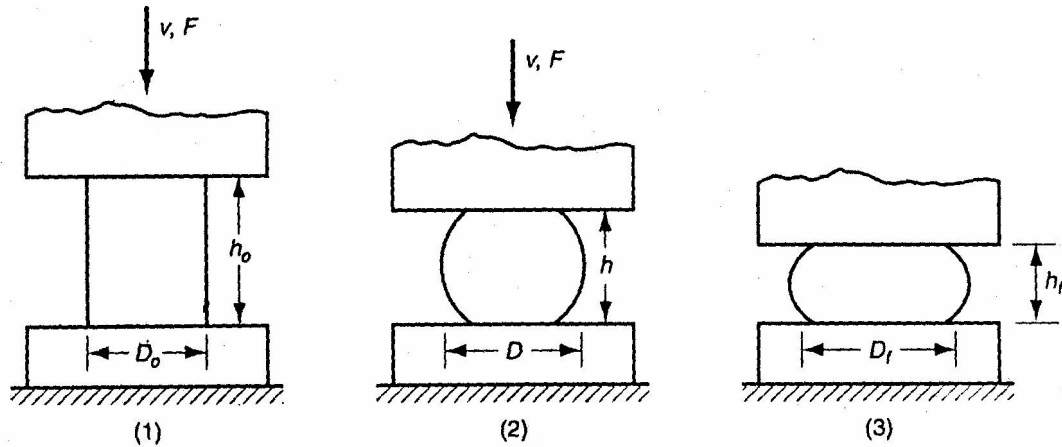


FIGURA 3.17 Deformación cilíndrica real de una parte de trabajo en forjado en dado abierto mostrando un abarillamiento pronunciado: (1) inicio del proceso, (2) deformación parcial y (3) forma final.

Todos estos factores originan que la fuerza de recalado sea más grande que la pronosticada por la ecuación 3.20. Podemos aplicar un factor de forma a la ecuación 3.20 para aproximar los efectos de la fricción y la relación entre el diámetro y la altura:

$$F = K_f Y_f A \quad (3.21)$$

Donde

$F$ ,  $Y_f$  y  $A$  tienen las mismas definiciones que en la ecuación 3.20;

$K_f$  = factor de forma del forjado, definido como:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h} \quad (3.22)$$

Donde

$\mu$  = coeficiente de fricción;

$D$  = diámetro de la parte de trabajo o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie, (mm);

$h$  = altura de la parte, (mm).

### EJEMPLO: 3.2 Forjado en dado abierto

Una parte cilíndrica se sujeta a una operación de recalado en forja. La pieza inicial tiene 3.0 pulg de altura y 2.0 pulg de diámetro. En la operación, su altura se reduce hasta 1.5 pulg. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por  $K = 50000 \text{ lb/pulg}^2$  y  $n = 0.17$ . Asuma un coeficiente de fricción de 0.1. Determine la fuerza al empezar el proceso, a las alturas intermedias 2.5 pulg, 2 pulg, y a la altura final 1.5 pulg.

**Solución:**

Volumen de la pieza es:

$$V = \frac{\pi D_o^2}{4} h_o = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} \cdot 3 = 9.425 \text{ pulg}^3$$

En el momento en que hace contacto con el dado superior,  $h = 3.0$  y la fuerza  $F = 0$ . Al principio de la fluencia,  $h$  es ligeramente menor que  $3.0$  pulg, y asumimos que la deformación  $\epsilon = 0.002$ , en la cual el esfuerzo de fluencia es:

$$Y_f = K\epsilon^n = 50000 \cdot 0.002^{0.17} = 17384 \text{ lb / pulg}^2$$

El diámetro es todavía aproximadamente  $D = 2.0$  pulg, y el área  $A = 3.142 \text{ pulg}^2$ . Para estas condiciones el factor de ajuste  $K_f$  se calcula como

$$K_f = 1 + 0.4 \cdot 0.1 \cdot \frac{2.0}{3.0} = 1.027$$

La fuerza de forjado es

$$F = 1.027 \cdot 17384 \cdot 3.142 = 56077 \text{ lb}$$

Para  $h = 2.5$  pulg

$$\epsilon = \ln \frac{3.0}{2.5} = \ln 1.2 = 0.1823$$

$$Y_f = 50000 \cdot 0.1823^{0.17} = 37438 \text{ lb / pulg}^2$$

Si suponemos un volumen constante y despreciamos el abarrilamiento,

$$A = \frac{9.426}{2.5} = 3.77 \text{ pulg}^2 \quad \text{y} \quad D = 2.19 \text{ pulg}$$

$$K_f = 1 + 0.4 \cdot 0.1 \cdot \frac{2.19}{2.5} = 1.035$$

$$F = 1.035 \cdot 37438 \cdot 3.77 = 146102 \text{ lb}$$

De igual manera, para  $h = 2.0$  pulg,  $F = 211894 \text{ lb}$ ; y a una  $h = 1.5$  pulg,  $F = 317\,500 \text{ lb}$ . La curva carga versus carrera de la figura 3.18 se construyó con los valores de este ejemplo.

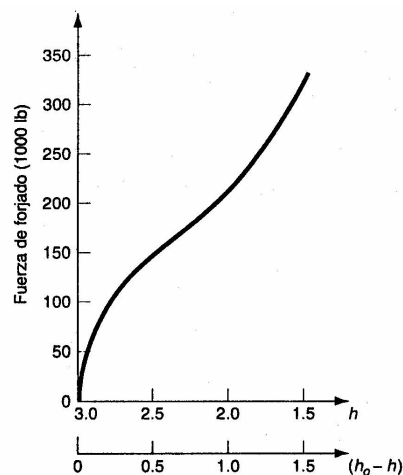


FIGURA 3.18 Fuerza de recalado en función de la altura  $h$  y de la reducción de altura  $(h_o - h)$ . A esta gráfica se le llama algunas veces curva carga-carrera.

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

El forjado con dado abierto puede realizarse con dados convexos, con dados cóncavos y por secciones, como se ilustran en la figura 3.19. El forjado con dados convexos es una operación de forja que se utiliza para reducir la sección transversal y redistribuir el metal en una parte de trabajo, como preparación para operaciones posteriores de formado con forja. El forjado con dados cóncavos es similar al anterior, excepto que los dados tienen superficies cóncavas.

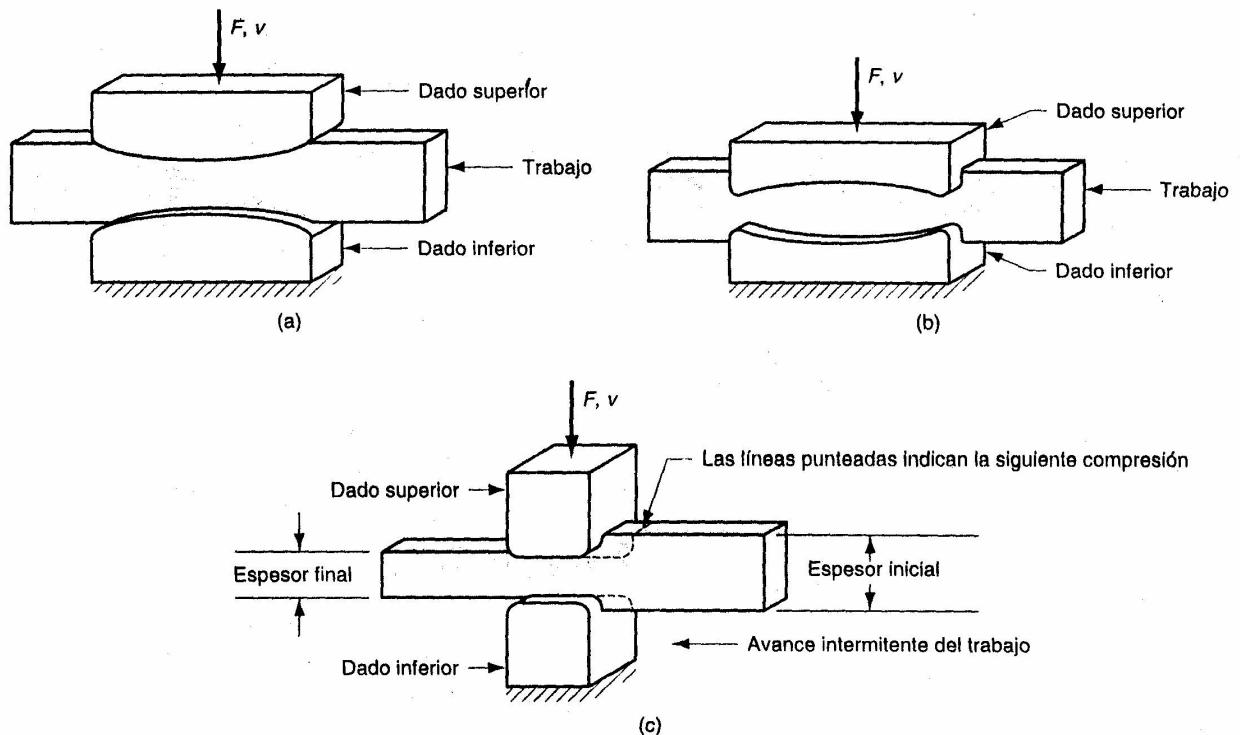


FIGURA 3.19 Varias operaciones de forjado en dado abierto: (a) con dados convexos, (b) con dados cóncavos y (c) por secciones.

Una operación de forjado por secciones consiste en una secuencia de compresiones a lo largo de una pieza de trabajo para reducir su sección transversal e incrementar su longitud. Se usa en la industria siderúrgica para producir lupias y planchas a partir de lingotes fundidos, en la operación se utilizan dados

abiertos con superficies planas o con un ligero contorno. Con frecuencia se usa el término forjado incremental para este proceso.

### 3.2.2.2. Forjado con dado impresor

Llamado algunas veces forjado en dado cerrado, se realiza con dados que tienen la forma inversa a la requerida para la parte. Este proceso se ilustra en una secuencia de tres pasos en la figura 3.20.

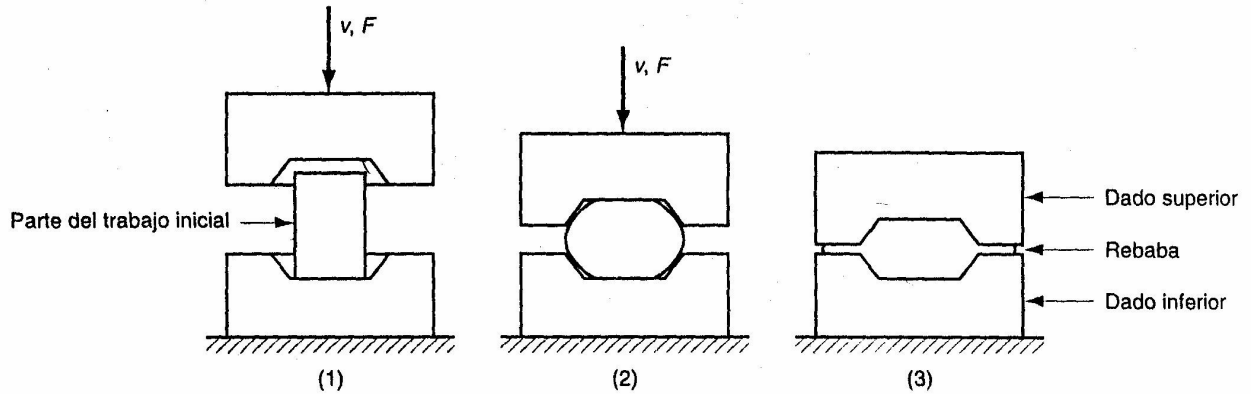


FIGURA 3.20 Secuencia en el forjado con dado impresor: (1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo en bruto, (2) compresión parcial, (3) cerradura final de los dados, ocasionando la formación de rebaba entre las placas del dado y (4) muestra una secuencia de pasos en la fabricación de una biela así como el dado

La pieza de trabajo inicial se muestra como una parte cilíndrica. Al cerrarse el dado y llegar a su posición final, el metal fluye más allá de la cavidad del dado y forma una rebaba en la pequeña abertura entre las placas del dado. Aunque la rebaba se recorta posteriormente, tiene realmente una función importante en el forjado por impresión, ya que cuando ésta empieza a formarse, la fricción se opone a que el metal siga fluyendo hacia la abertura, y de esta manera fuerza al material de trabajo a permanecer en la cavidad. En el formado en caliente, la restricción del flujo de metal es mayor debido a que la rebaba delgada se enfría rápidamente contra las placas del dado, incrementando la resistencia a la deformación. La restricción del flujo de metal en la abertura hace que las presiones de compresión se incrementen significativamente, forzando al material a llenar los detalles algunas veces intrincados de la cavidad del dado, con esto se obtiene un producto de alta calidad.

Con frecuencia se requieren varios pasos en el forjado con dado impresor para transformar la forma inicial en la forma final deseada, como se muestra en la figura 3.20(4). Para cada paso se necesitan cavidades separadas. Los pasos iniciales se diseñan para redistribuir el metal en la parte de trabajo y conseguir así una deformación uniforme y la estructura metálica requerida para las etapas siguientes. Los últimos pasos le dan el acabado final a la pieza. Además, cuando se usan martinetes; se pueden requerir varios golpes de martillo para cada paso. Cuando el forjado con martinete se hace a mano, como sucede a menudo, se requiere considerable habilidad del operador para lograr resultados consistentes en condiciones adversas.

Debido a la formación de rebaba en el forjado con dado impresor y a las formas más complejas de las partes hechas con estos dados, las fuerzas en este proceso son considerablemente más grandes y más difíciles de analizar a diferencia del forjado con dado abierto. Con frecuencia se usan fórmulas y factores de diseño relativamente simples para estimar las fuerzas en el forjado con dado impresor. La fórmula de la fuerza es la misma de la ecuación 3.21 para el forjado en dado abierto, pero su interpretación es ligeramente diferente:

$$F = K_f Y_f A \quad (3.23)$$

Donde

$F$  = fuerza máxima en la operación, (N);

$A$  = área proyectada de la parte, incluyendo la rebaba, ( $\text{mm}^2$ );

$Y_f$  = esfuerzo de fluencia del materia (MPa);

$K_f$  = factor de forma del forjado

En el forjado en caliente, el valor apropiado de  $Y_f$  es la resistencia a la fluencia del metal a temperatura elevada. En otros casos, la selección del valor apropiado del esfuerzo de fluencia es difícil porque para las formas complejas el esfuerzo varía a través de la pieza de trabajo. En la ecuación 3,23  $K_f$  es un factor con el que se intenta tomar en cuenta el incremento de la fuerza requerida para forjar formas complejas. La tabla 3.3 muestra la escala de valores de  $K_f$  para diferentes formas de la parte. Obviamente, el problema al especificar el valor apropiado de  $K_f$  para una forma dada de trabajo, limita la precisión de la estimación.

Tabla 3.3 Valores típicos de  $K_f$  para varias formas de la parte en forjado con dado impresor y en dado cerrado.

Forma de la parte	$K_f$
Forjado con dado impresor	
Formas simples con rebaba	6.0
Formas complejas con rebaba	8.0
Formas muy complejas con rebaba	10,0
Forjado sin rebaba	
Acuñado (superficies superior e inferior)	6.0
Formas complejas	8.0

La ecuación 3.23 se aplica para el cálculo de la fuerza máxima durante la operación, ya que ésta determinará la capacidad requerida en la prensa o martinete que se usara en la operación. La fuerza máxima se alcanza al final de la carrera o golpe de forjado donde el área proyectada es más grande y la fricción es máxima.

El forjado con dado impresor no tiene tolerancias estrechas de trabajo y frecuentemente se requiere el maquinado para lograr la precisión necesaria. El proceso de forjado genera la geometría básica de la parte y el maquinado realiza los acabados de precisión que se requieren en algunas porciones de la parte (por ejemplo, perforaciones, cuerdas y superficies que deben coincidir con otros componentes). Las ventajas del forjado sobre el maquinado completo de la parte son: velocidad de producción más alta, conservación del metal, mayor resistencia y orientación más favorable de los granos de metal. En la figura 3.21 se ilustra una comparación del flujo granular en el forjado y en el maquinado.

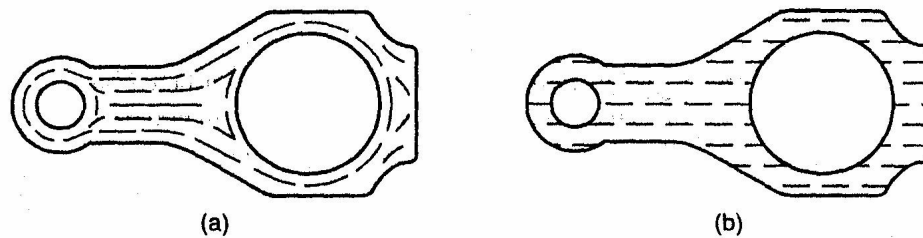


FIGURA 3.21 Comparación del flujo de granos metálicos en una parte que es: (a) forjada en caliente con acabado maquinado y (b) completamente maquinada

Los mejoramientos de la tecnología del forjado con dado impresor han tenido como resultado la capacidad de producir forjados con secciones más delgadas, formas más complejas, reducción drástica de los requerimientos de ahusamiento en los dados, tolerancias más estrechas y la virtual eliminación de concesiones al maquinado. Los procesos de forjado con estas características se conocen como forjado de precisión.



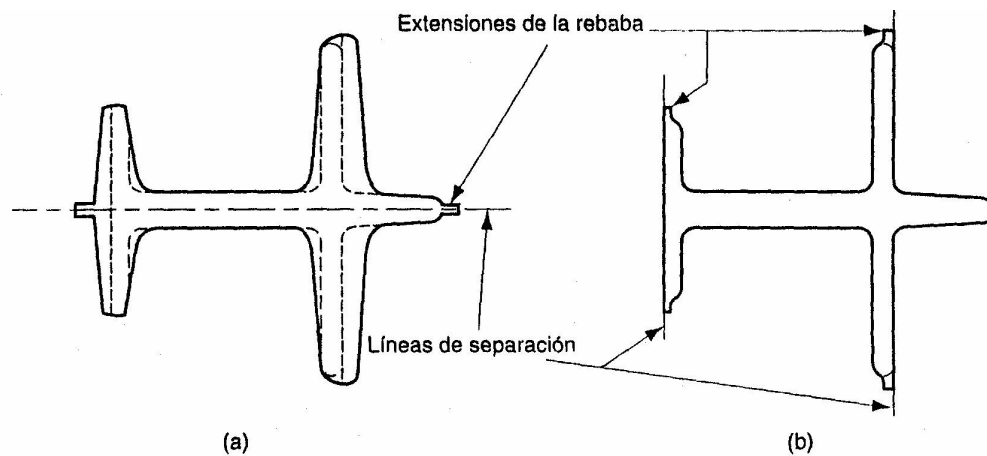


FIGURA 3.22 Secciones transversales de (a) forjado convencional y (b) forjado de precisión. Las líneas punteadas en (a) indican los requerimientos de maquinado posterior para convertir una pieza de forjado convencional en una forma equivalente a la de forjado de precisión. En ambos casos tiene que recortarse la rebaba.

Los metales más comunes que se usan en el forjado de precisión son el aluminio y el titanio. En la figura 3.22 se muestra una comparación del forjado de precisión y el forjado convencional con dado impresor. Nótese que el forjado de precisión en este ejemplo no elimina las rebabas, aunque si las reduce. Algunas operaciones de forjado de precisión se realizan sin producir rebaba. El forjado de precisión se clasifica propiamente como un proceso de forma neta o casi neta, dependiendo de la necesidad del maquinado para acabar la forma de la parte.

### 3.2.2.3. Forjado sin rebaba

En la terminología industrial, el forjado con dado impresor se llama algunas veces forjado en dado cerrado. Sin embargo, hay una distinción técnica entre forjado con dado impresor y forjado con dado cerrado real. La distinción es que en el forjado con dado cerrado, la pieza de trabajo original queda contenida completamente dentro de la cavidad del dado durante la compresión y no se forma rebaba. La secuencia del proceso se ilustra en la figura 3.23. Para identificar este proceso es apropiado el término *forjado sin rebaba*.

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

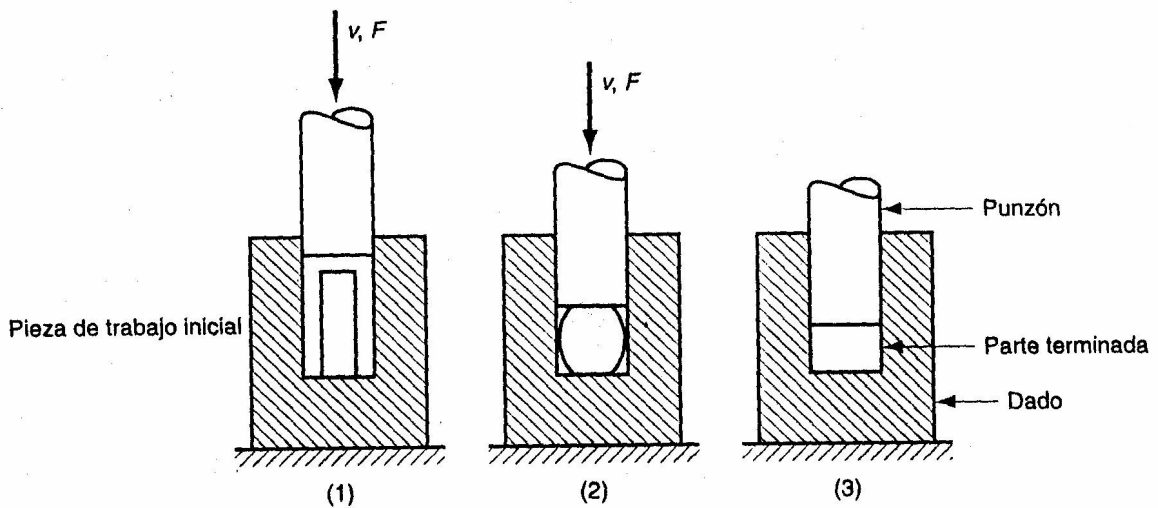


FIGURA 3.23 Forjado sin rebaba: (1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo, (2) compresión parcial y (3) final de la carrera del punzón y cierre del dado. Los símbolos  $v$  y  $F$  indican movimiento ( $v$  = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

Las fuerzas en el forjado sin rebaba alcanzan valores comparables a las del forjado con dado impresor. Estas fuerzas se pueden, estimar usando los mismos métodos para el forjado con dado impresor, ecuación 3.23 y tabla 3.3.

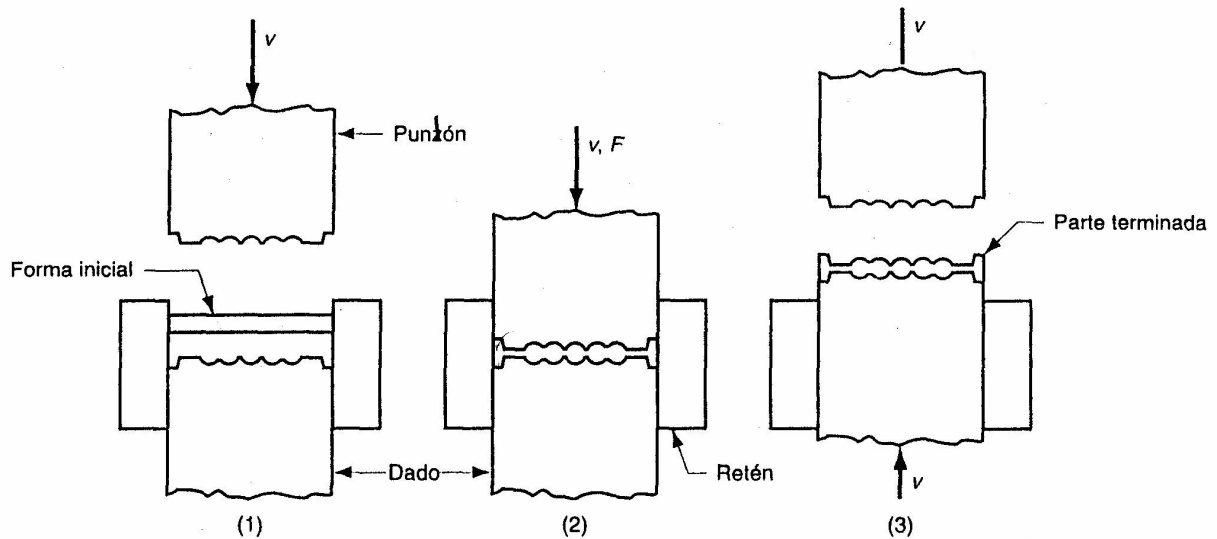


FIGURA 3.24 Operación de acuñado: (1) inicio del ciclo, (2) tiempo de compresión y (3) remoción de la parte terminada.

El acuñado es una aplicación especial del forjado sin rebaba mediante el cual se imprimen los finos detalles del dado en la superficie superior y en el fondo de la pieza de trabajo. En el acuñado hay poco flujo de metal; no obstante, las presiones requeridas para reproducir los detalles superficiales de la cavidad del dado son altas, como se indica por el valor de  $K_f$  en la tabla 3.3. Una aplicación común del

acuñado es desde luego la acuñación de monedas, que se ilustra en la figura 3.24. El proceso se usa también para dar acabados superficiales y de precisión dimensional a algunas partes fabricadas por otras operaciones

#### 3.2.2.4. Dados de forjado, martinets y prensas

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

**Martinets de forja** Estos martinets funcionan aplicando una descarga por impacto contra el material de trabajo. Se usa frecuentemente el término martinete de caída libre para designar, estas máquinas, por la forma de liberar la energía de impacto (véanse figuras 3.25(a))

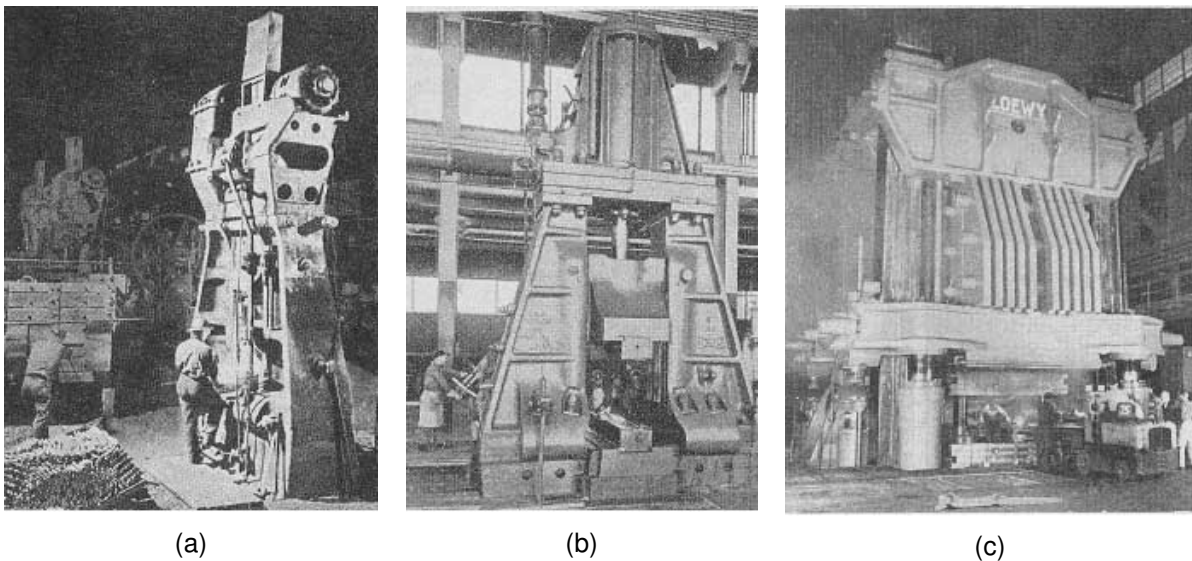


FIGURA 3.25 (a) Martinete de vapor con doble marco (b) Martinete de caída libre (c) presa de forja hidráulica de treinta y cinco mil toneladas.

Los martinets se usan más frecuentemente para forjado con dado impresor. La parte superior del dado de forjado se fija al pisón y la parte inferior se fija al yunque. En la operación, el material de trabajo se coloca en el dado inferior, el pisón se eleva y luego se deja caer sobre la pieza de trabajo. Cuando la parte superior del dado golpea el material de trabajo, la energía del impacto ocasiona que la parte tome la forma de la cavidad del dado. Se necesitan varios golpes de martillo para lograr el cambio deseado de forma. Los martinets se pueden clasificar cómo martinets de caída libre y martinets de potencia. *Los martinets de caída libre* generan su energía por el peso de un pisón que cae libremente. La fuerza del golpe se determina por la altura de la caída y el peso del pisón. Los martinets de potencia aceleran el

pisón con presión de aire o vapor figura 3.25(b). Una desventaja del martinete de caída libre es que una gran parte de la energía del impacto se trasmite a través del yunque al piso del edificio.

**Prensas de forjado** Las prensas aplican una presión gradual, en lugar de impactos repentinos para realizar las operaciones de forja figura 3.25(c). Las prensas de forjado incluyen prensas mecánicas, prensas hidráulicas y prensas de tornillo. *Las prensas mecánicas* funcionan por medio de excéntricos, manivelas y juntas o articulaciones de bisagra que convierten el movimiento giratorio de un motor en movimientos de traslación del pisón. Las prensas mecánicas típicas alcanzan fuerzas muy altas en el fondo del recorrido de forjado. *Las prensas hidráulicas* usan un cilindro hidráulico para accionar el pisón. *Las prensas de tornillo* aplican la fuerza por medio de un tornillo que mueve al pisón vertical. Tanto las prensas de tornillo como las hidráulicas operan a velocidades bajas del pisón o ariete y pueden suministrar una fuerza constante a través de la carrera. Por tanto, estas máquinas son apropiadas para las operaciones de forjado (y otras operaciones de formado) que requieren grandes carreras.

**Dados de forjado** Es importante el diseño de los dados para el éxito de la operación de forjado. Las partes que se forjan deben diseñarse con el conocimiento de los principios y limitaciones de este proceso. Nuestro objetivo es describir parte de la terminología y algunos lineamientos que se usan en el diseño de dados para forja. El diseño de los dados abiertos es generalmente trivial ya que su forma es relativamente simple. Nuestros comentarios se aplican a los dados impresores y a los dados cerrados. La figura 3.26 define parte de la terminología en un dado de impresión.

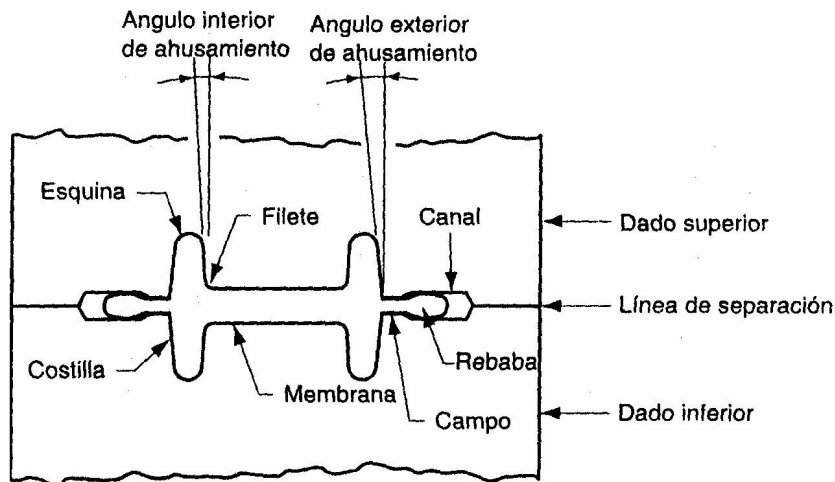


FIGURA 3.26 Terminología para un dado convencional en forjado con dado impresor.

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

- **Línea de separación.** La línea de separación o partición es el plano que divide la parte superior del dado de la parte inferior. La llamada línea de rebaba en el forjado con dado impresor es el plano

donde se encuentran las dos mitades del dado. Su mala selección afecta el flujo de los granos en la pieza, la carga requerida y la formación de rebaba.

- **Ahusamiento** (ángulo de salida). Es el grado de inclinación que se requiere en los lados de la pieza para poder retirarla del dado. El término se aplica también al ahusamiento en los lados de la cavidad del molde. Los ángulos típicos de salida son de  $3^\circ$  para el aluminio y el magnesio, y de  $5^\circ$  a  $7^\circ$  para partes de acero. Los ángulos de tiro para forjados de precisión son cercanos a cero.
- **Membranas y costillas**. Una membrana es una porción delgada del forjado que es paralela a la línea de separación, mientras que una costilla es una porción delgada perpendicular a la línea de separación. Estas características de la parte producen dificultad en el flujo de metal al adelgazarse.
- **Filetes y radios de las esquinas**. Los filetes y las esquinas se ilustran en la figura 3.26. Los radios pequeños tienden a limitar el flujo de metal e incrementar la resistencia en las superficies del dado durante el forjado.
- **Rebaba**. La formación de rebaba juega un papel crítico en el forjado con dados de impresión porque causa una acumulación de la presión dentro del dado que promueve el llenado de la cavidad. Esta acumulación de presión se controla diseñando un campo para la rebaba y un canal dentro del dado, como se muestra en la figura 3.26. El campo determina el área superficial a lo largo del cual ocurre el flujo lateral del metal, controlando así el incremento de la presión dentro del dado. El canal permite que escape material en exceso y evita que la carga de forjado se eleve a valores extremos.

### 3.2.2.5. Otras operaciones de forja

Aparte de las operaciones convencionales de forja descritas en las secciones anteriores hay otras operaciones de formado para metal que están relacionadas se asocian muy cerca con el forjado.

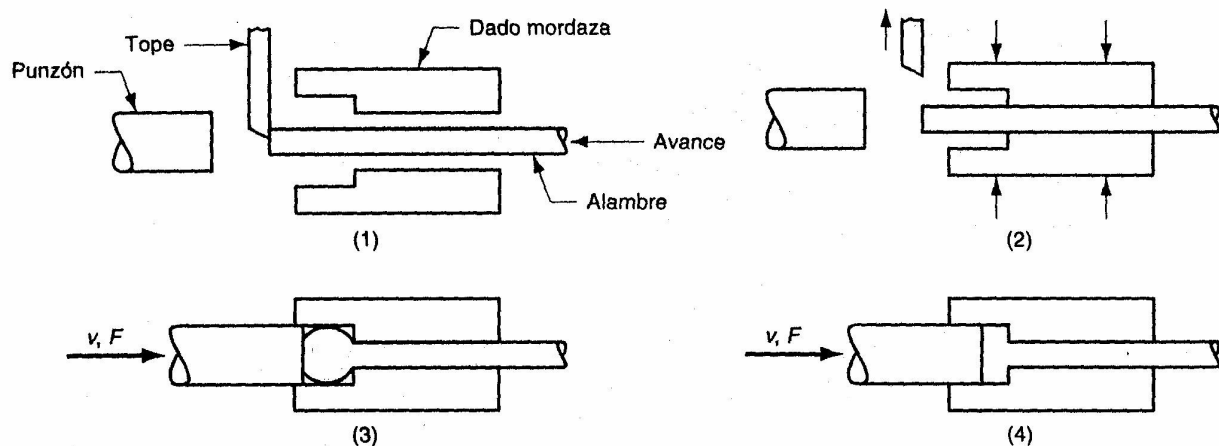


FIGURA 3.27 Una operación de recalcado para formar la cabeza de un perno u otro artículo similar. El ciclo consiste en: (1) el alambre se alimenta hasta el tope, (2) los dados mordaza se cierran apretando el material y el tope se retira, (3) el punzón avanza y (4) loca fondo para formar la cabeza.

**Recalcado y encabezamiento** El recalcado (también llamado forjado de recalcado) es una operación de deformación en la cual una parte o pieza de trabajo cilíndrica aumenta su diámetro y reduce su longitud. Esta operación se analizó en nuestra descripción del forjado en dado abierto (sección 3.2.2.1). Sin embargo, es una operación industrial que puede también ejecutarse como un forjado en dado cerrado como se observa en la figura 3.27.

El recalcado se usa ampliamente en la industria de los sujetadores para formar cabezas de clavos, pernos y productos similares de ferretería. En estas aplicaciones se emplea frecuentemente el término encabezamiento para denotar la operación. La figura 3.28 ilustra una variedad de aplicaciones del encabezamiento, indicando varias configuraciones posibles del dado. Debido a este tipo de aplicaciones, se producen más partes por recalcado que por cualquier otra operación de forjado. El recalcado se realiza como una operación de producción en masa en frío, en tibio o en caliente, con máquinas especiales de recalcado por forja, llamadas formadoras de cabezas. En general, estas máquinas se equipan con deslizaderas horizontales, en lugar de las verticales usadas en los martinets y prensas convencionales. El material con que se alimentan estas máquinas son barras o alambres, se forman las cabezas en los extremos de las barras y luego se corta la pieza a la longitud adecuada para hacer el artículo de ferretería deseado. Se usa el laminado de cuerdas para formar las piezas completas de pernos y tornillos.

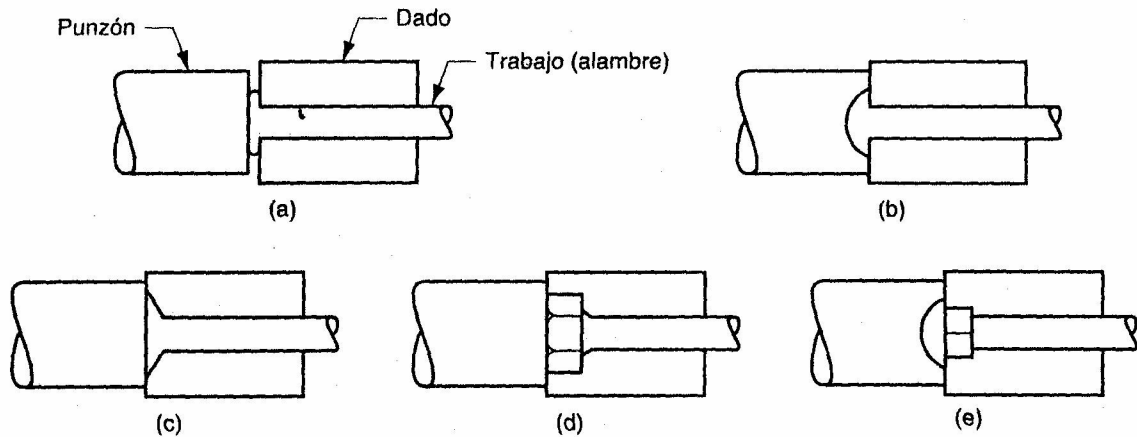


FIGURA 3.28 Ejemplos de formación de cabezas (forjado recalcado): (a) cabeza de clavo usando dados abiertos, (b) cabeza redonda formada por el punzón, (c) y (d) cabezas formadas por el dado, y (e) perno (le carro formado por el dado y el punzón).

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

**Estampado (suajeado) con forja y forjado radial** Son procesos de forjado que se usan para reducir el diámetro de un tubo o barra sólida. El estampado se ejecuta frecuentemente sobre el extremo

de una pieza de trabajo para crear una sección abusada. El proceso de estampado, que se muestra en la figura 3.29, se realiza por medio de dados rotatorios que golpean en una pieza de trabajo radialmente hacia dentro para ahusarla conforme la pieza avanza dentro de los dados. La figura 3.30 ilustra algunas de las formas y productos que se hacen por estampado. Se requiere algunas veces un mandril para controlar la forma y tamaño del diámetro interno de las partes tubulares que se estampan. El forjado radial es similar al estampado en su acción contra la parte y se usa para crear formas similares. La diferencia es que en el forjado radial los dados no giran alrededor de la pieza de trabajo; en su lugar, el material de trabajo es el que gira al avanzar dentro de los dados martillo.

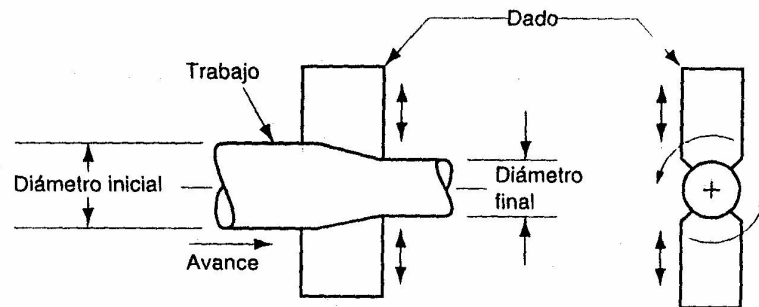


FIGURA 3.29 Proceso de estampado (suajeado) para reducir material en barra sólida; los dados giran al martillar el material de trabajo. En el forjado radial el material gira mientras los dados permanecen en posición fija martillando el material de trabajo.

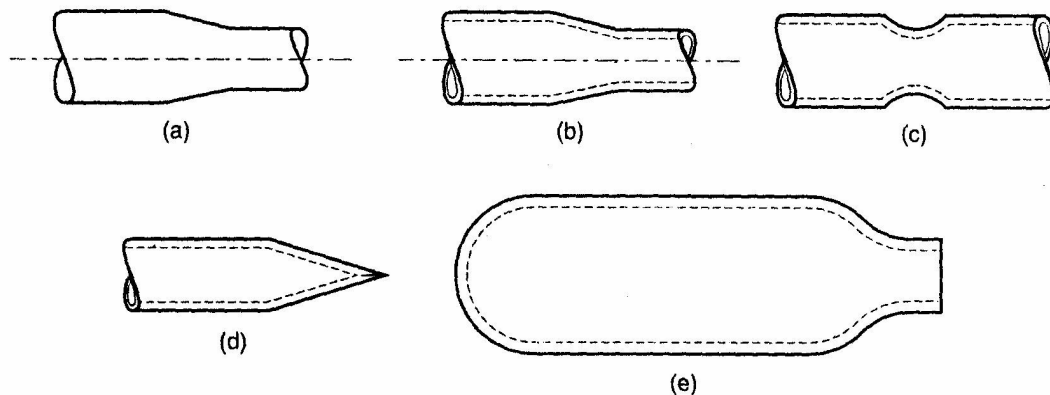


FIGURA 3.30 Ejemplos de partes hechas por estampado (a) reducción de material sólido, (b) ahusado (le un tubo, (c) estampado para formar un canal en un tubo, (d) afilado de un tubo y (e) estampado del cuello en un cilindro de gas.

**Forjado con rodillos** Es un proceso de deformación que se usa para reducir la sección transversal de una pieza de trabajo cilíndrica (o rectangular), ésta pasa a través de una serie de rodillos opuestos con canales que igualan la forma requerida por la parte final. La operación típica se ilustra en la figura 3.31 El forjado con rodillos se clasifica generalmente como un proceso de forja, aun cuando utiliza rodillos. Los rodillos no giran continuamente, sino solamente a través de una porción de revolución que

corresponde a la deformación que requiere la parte. Las partes forjadas con rodillos son generalmente más fuertes y poseen una estructura granular favorable con respecto a otros procesos competidores como el maquinado que puede usarse para producir estas mismas partes.

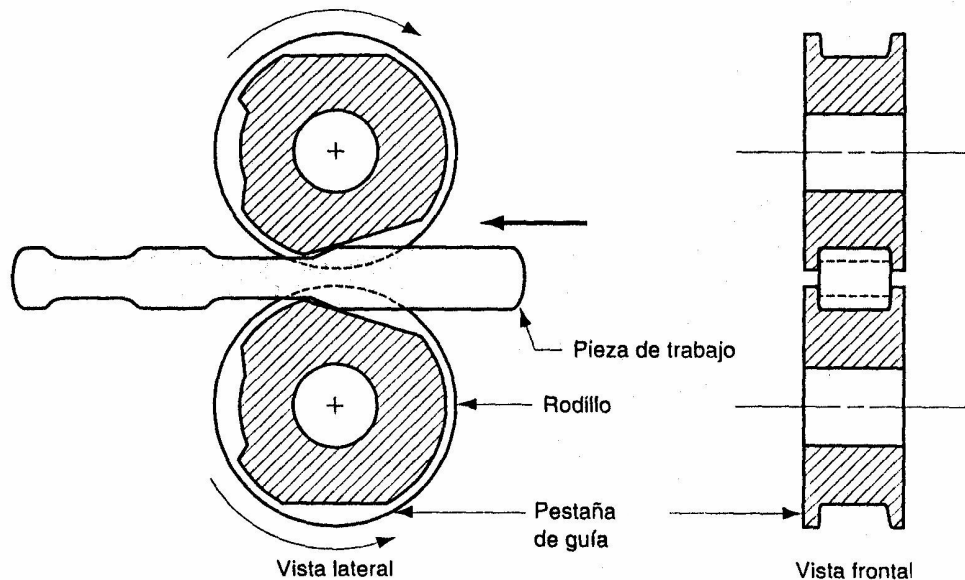


FIGURA 3.31 Forjado con rodillos.

**Forjado orbital** En este proceso, la deformación ocurre por medio de un dado superior en forma de cono que presiona y gira simultáneamente sobre el material de trabajo, como se ilustra en la figura 3.32. El material de trabajo se comprime sobre un dado inferior que tiene una cavidad. Debido a que el eje del cono está inclinado, solamente una pequeña área de la superficie del material de trabajo se comprime en cualquier momento. Al revolver el dado superior, el área bajo compresión también gira. Estas operaciones características del forjado orbital producen una reducción sustancial en la carga requerida de la prensa para alcanzar la deformación del material del trabajo.

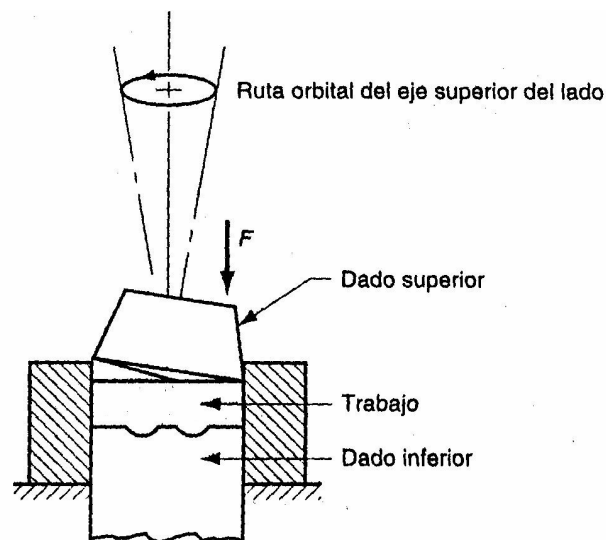


FIGURA 3.32 Forjado orbital. Al final del ciclo de deformación, el dado inferior se eleva para expulsar la parte,



**Punzonado** El punzonado en forja es un proceso de deformación en el cual se prensa una forma endurecida de acero sobre un bloque de acero suave (u otro metal suave). El proceso se usa frecuentemente para hacer cavidades de moldes para moldeo de plásticos y fundición en dados, como se muestra en la figura 3.33. La forma de acero endurecido se llama punzón o fresa y está maquinada con la geometría de la parte que se va a moldear. Para forzar la fresa dentro del bloque de metal suave se requiere una presión sustancial, esto se logra generalmente con una prensa hidráulica. La formación completa de la cavidad del dado en el bloque requiere frecuentemente varios pasos, como el fresado seguido del recocido para remover el endurecimiento por deformación. Cuando el bloque del material se ha deformado en cantidades significativas, como se muestra en la figura, se elimina el exceso por maquinado. La ventaja del punzonado en esta aplicación es que es más fácil maquinar la forma positiva que erosionar la cavidad negativa. Esta ventaja se multiplica en los casos donde se tienen que hacer cavidades múltiples en el bloque del dado.

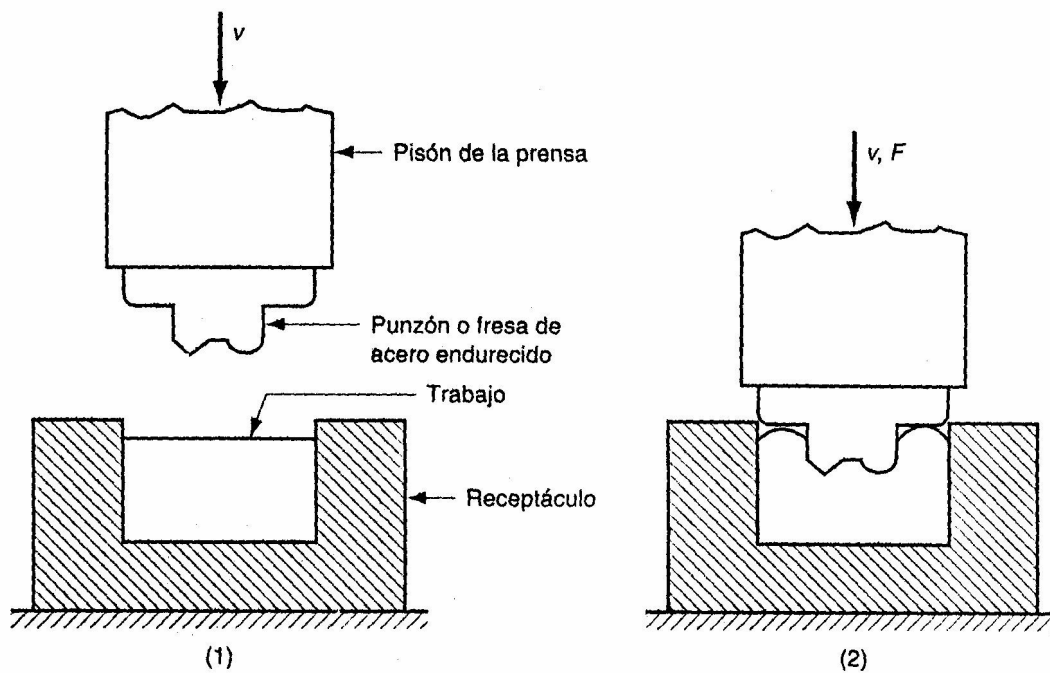


FIGURA 3.33 Punzonado: (1) antes de la deformación y (2) al completarse el proceso. Nótese que el material en exceso formado por la penetración de la fresa debe removerse por maquinado.

**Forjado isotérmico** en dado caliente El forjado isotérmico es un término que se aplica a operaciones de forjado caliente, donde la parte de trabajo se mantiene a temperaturas elevadas durante todo el proceso. Si se evita que la pieza de trabajo se enfríe al contacto con la superficie fría de los dados, como se hace en el forjado convencional, el metal fluye más fácilmente y la fuerza requerida para desempeñar el proceso se reduce. El forjado isotérmico es más costoso que el forjado convencional y se reserva para metales difíciles de forjar, como el titanio y las superaleaciones, y para partes complejas. El proceso se lleva a cabo algunas veces al vacío para evitar la oxidación rápida del material del dado.

Similar al forjado isotérmico es el forjado con dado caliente, en el cual se calientan los dados a una temperatura algo menor que la del metal de trabajo.

**Recortado** El recortado es una operación que se usa para remover la rebaba de la parte de trabajo en el forjado con dado impresor. El recortado en la mayoría de los casos se realiza por cizallamiento como en la figura 3.34, en la cual un punzón fuerza el material de trabajo a través de un dado de corte, cuyo contorno tiene el perfil de la parte deseada. El recorte se hace usualmente mientras el material de trabajo está aún caliente, esto significa que se debe incluir una prensa de recortado separada por cada martinete o prensa. En los casos donde el trabajo podría dañarse por el proceso de corte, el recorte puede hacerse por medios alternativos, como esmerilado o aserrado.

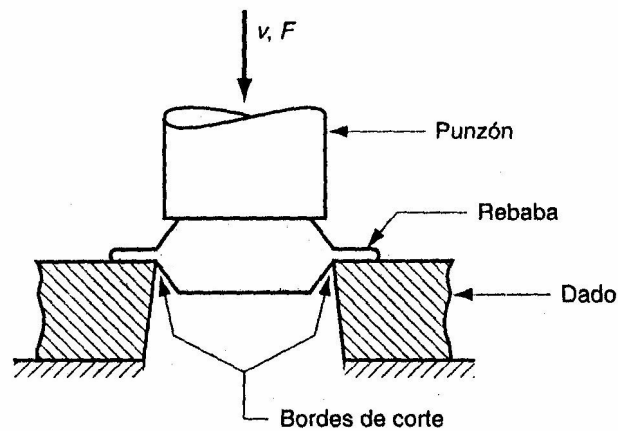


FIGURA 3.34 Operación de recorte (proceso de cizalla) para remover la rebaba después del forjado con dado impresor.