

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.

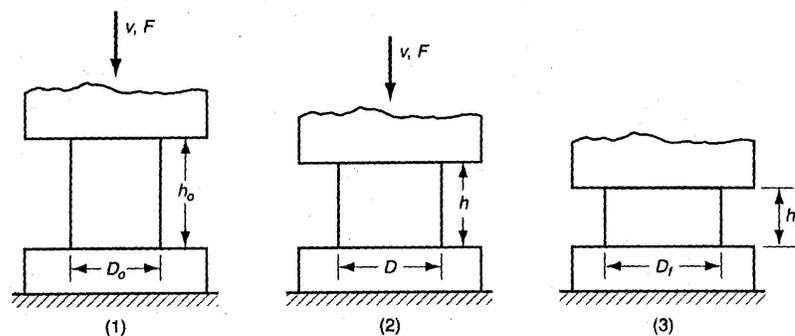


FIGURA 3.16 Deformación homogénea de una parte de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales en una operación de forjado en dado abierto: (1) inicio del proceso con la parte de trabajo a su altura y diámetros originales, (2) compresión parcial y (3) tamaño final.

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, (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.

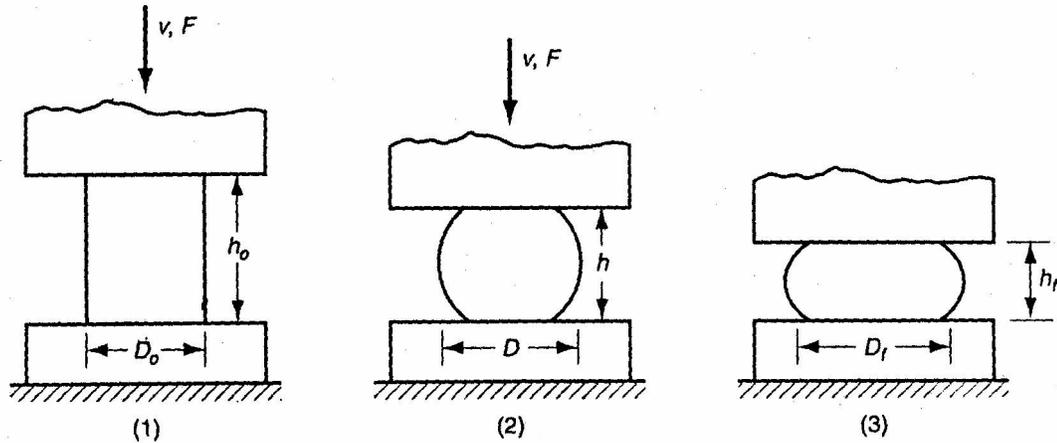


FIGURA 3.17 Deformación cilíndrica real de una parte de trabajo en forjado en dado abierto mostrando un abarillamiento pronunciado: (1) inicio del proceso, (2) deformación parcial y (3) forma final.

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

μ = 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.

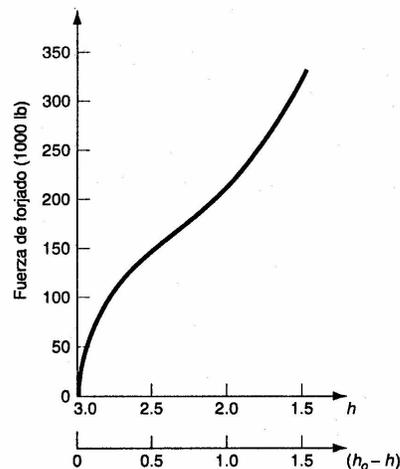


FIGURA 3.18 Fuerza de recalado en función de la altura h y de la reducción de altura $(h_o - h)$. A esta gráfica se le llama algunas veces curva carga-carrera.

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.

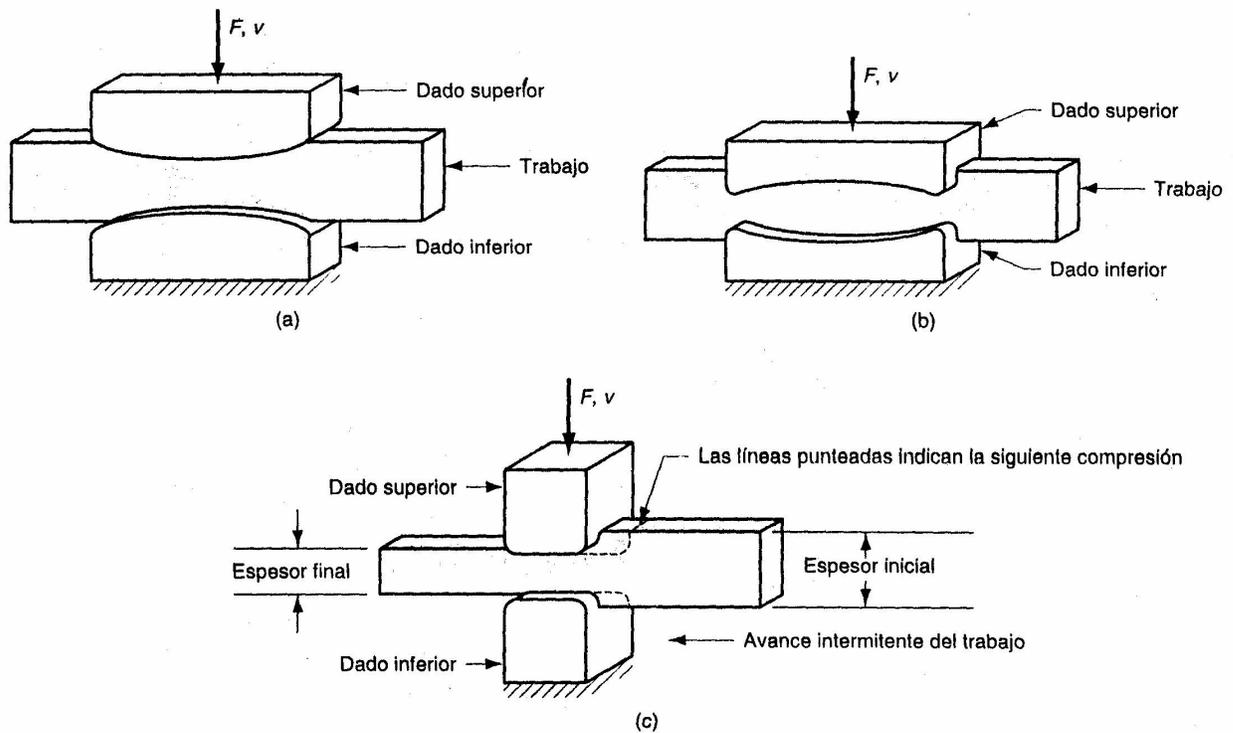


FIGURA 3.19 Varias operaciones de forjado en dado abierto: (a) con dados convexos, (b) con dados cóncavos y (c) por secciones.

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.

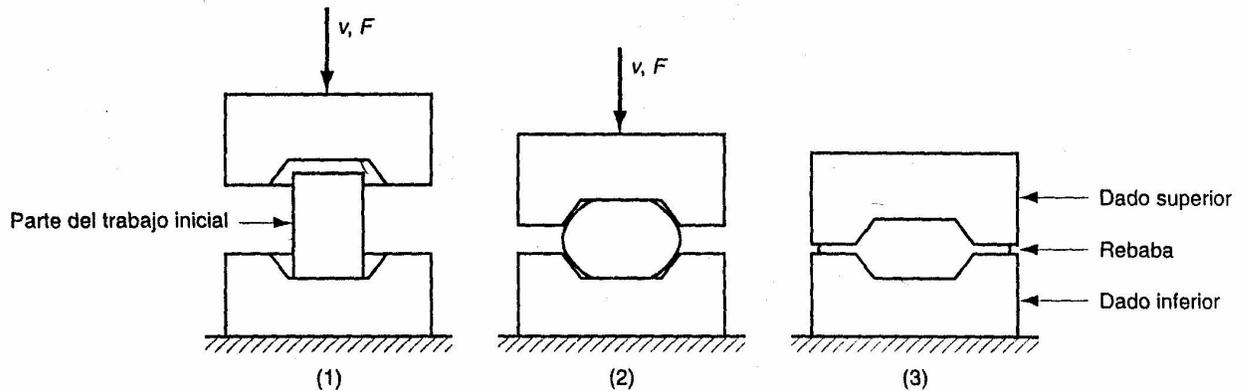


FIGURA 3.20 Secuencia en el forjado con dado impresor: (1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo en bruto, (2) compresión parcial, (3) cerradura final de los dados, ocasionando la formación de rebaba entre las placas del dado y (4) muestra una secuencia de pasos en la fabricación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

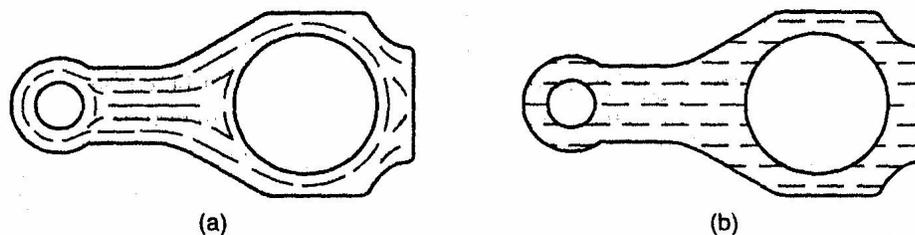


FIGURA 3.21 Comparación del flujo de granos metálicos en una parte que es: (a) forjada en caliente con acabado maquinado y (b) completamente maquinada

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.

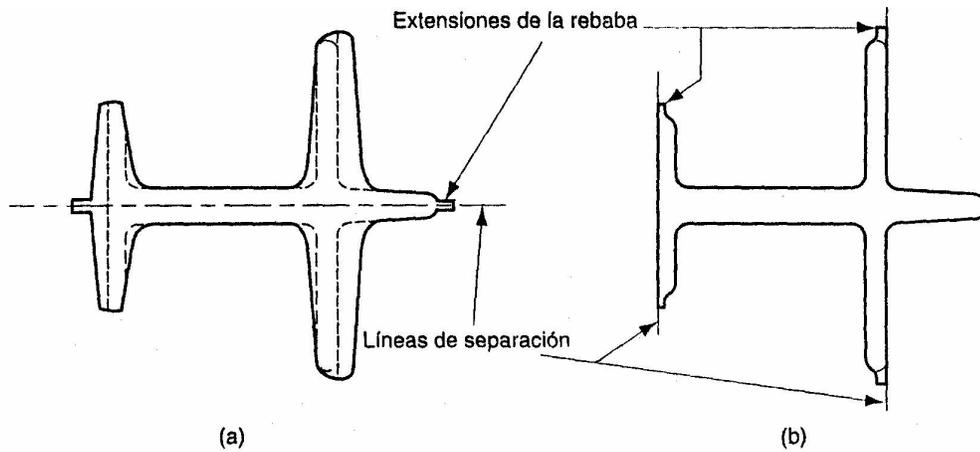


FIGURA 3.22 Secciones transversales de (a) forjado convencional y (b) forjado de precisión. Las líneas punteadas en (a) indican los requerimientos de maquinado posterior para convertir una pieza de forjado convencional en una forma equivalente a la de forjado de precisión. En ambos casos tiene que recortarse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

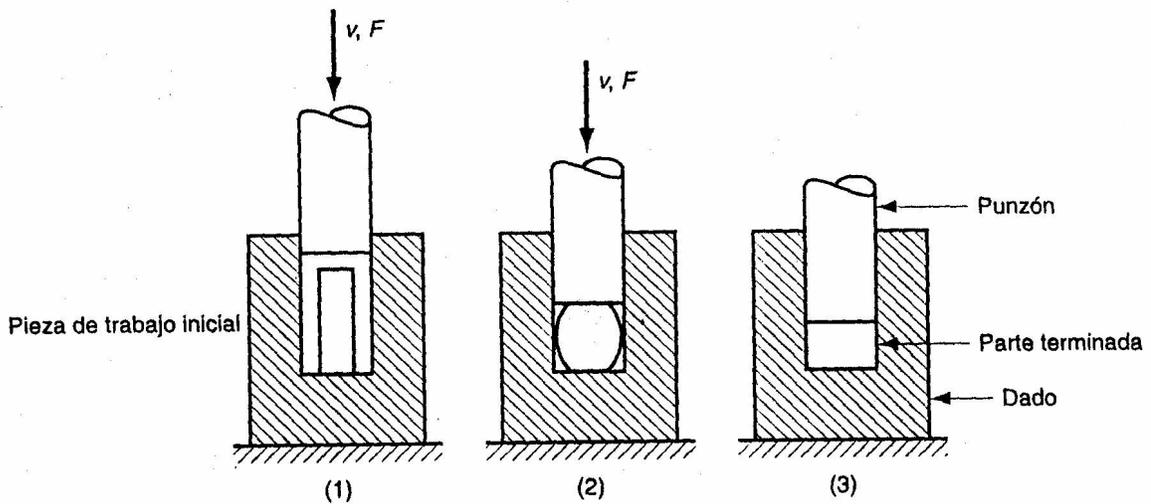


FIGURA 3.23 Forjado sin rebaba: (1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo, (2) compresión parcial y (3) final de la carrera del punzón y cierre del dado. Los símbolos v y F indican movimiento (v = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

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.

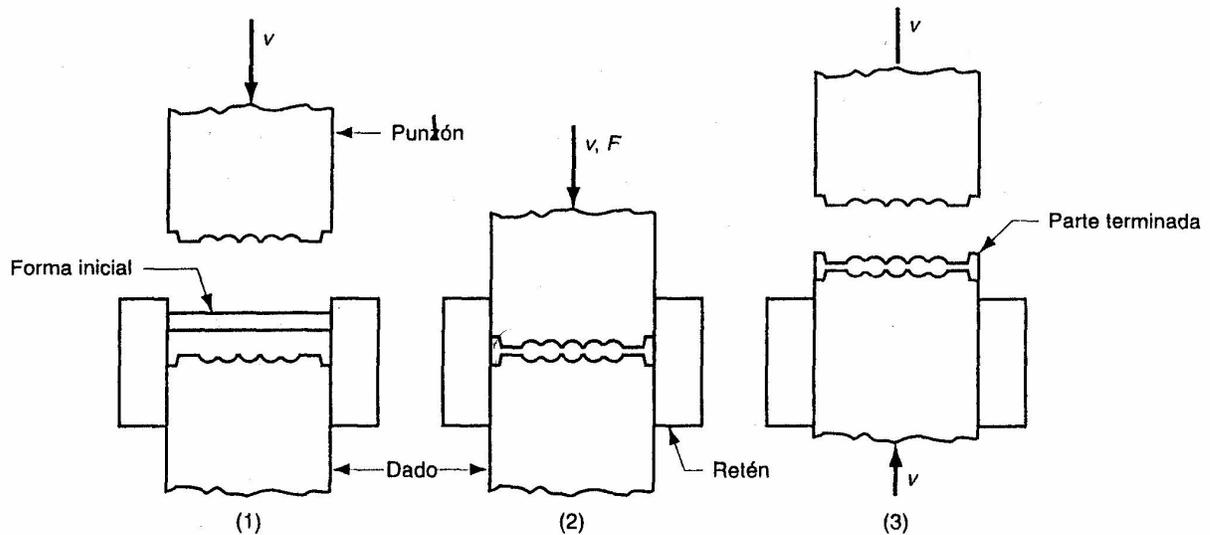


FIGURA 3.24 Operación de acuñado: (1) inicio del ciclo, (2) tiempo de compresión y (3) remoción de la parte terminada.

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