

PROCESOS DE FORJA

EL FORJADO ES UN PROCESO DE DEFORMACIÓN EN EL CUAL SE COMPRIME EL MATERIAL DE TRABAJO ENTRE DOS DADOS, USANDO IMPACTO O PRESIÓN GRADUAL PARA FORMAR LA PARTE.



El forjado 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.

Además, las industrias del acero y de otros metálicos básicos usan el forjado para fijar la forma básica de grandes componentes que luego se maquinan para lograr su forma final y dimensiones definitivas.

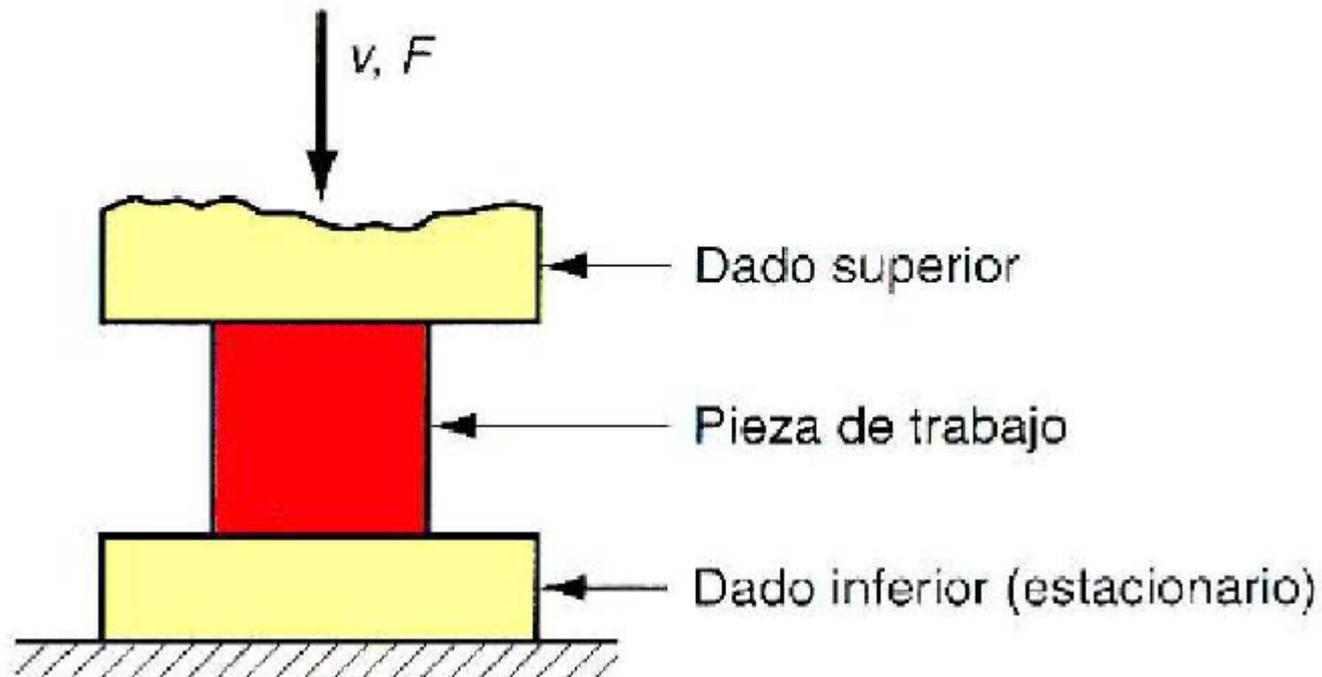
La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente (por arriba y por debajo de la temperatura de recristalización), dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo, sin embargo, el forjado en frío también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

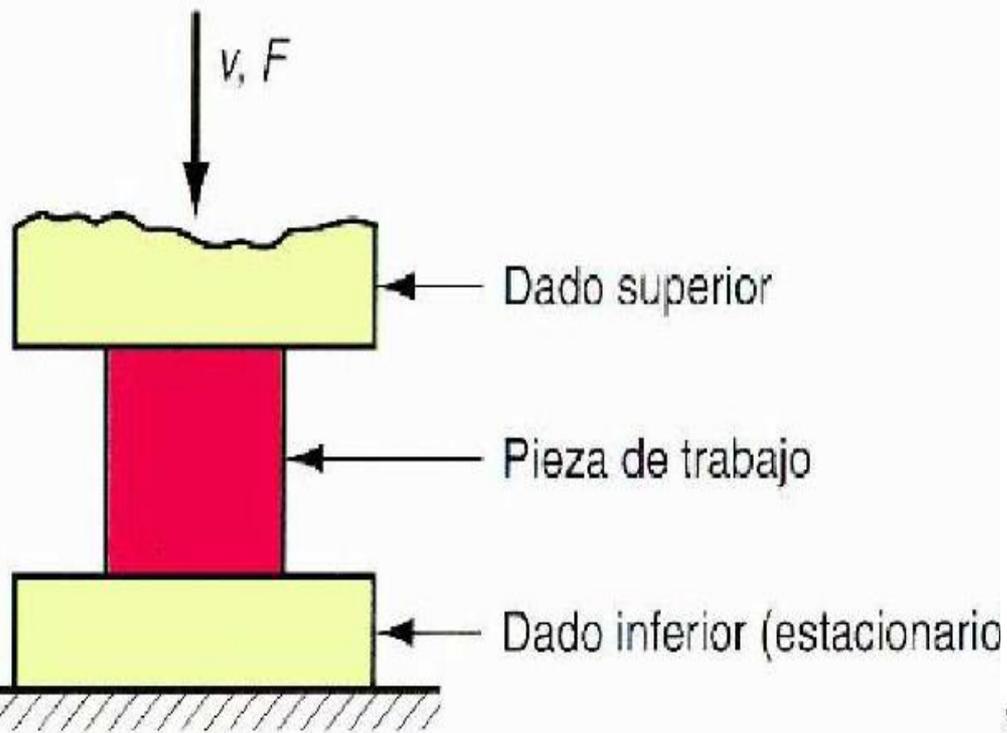
Otra diferencia entre las operaciones de forjado es el grado en que los dados restringen el flujo del metal de trabajo. Atendiendo a esta clasificación hay tres tipos de operaciones de forjado:

- a) forjado en dado abierto,
- b) forjado en dado impresor y
- e) forjado sin rebaba.

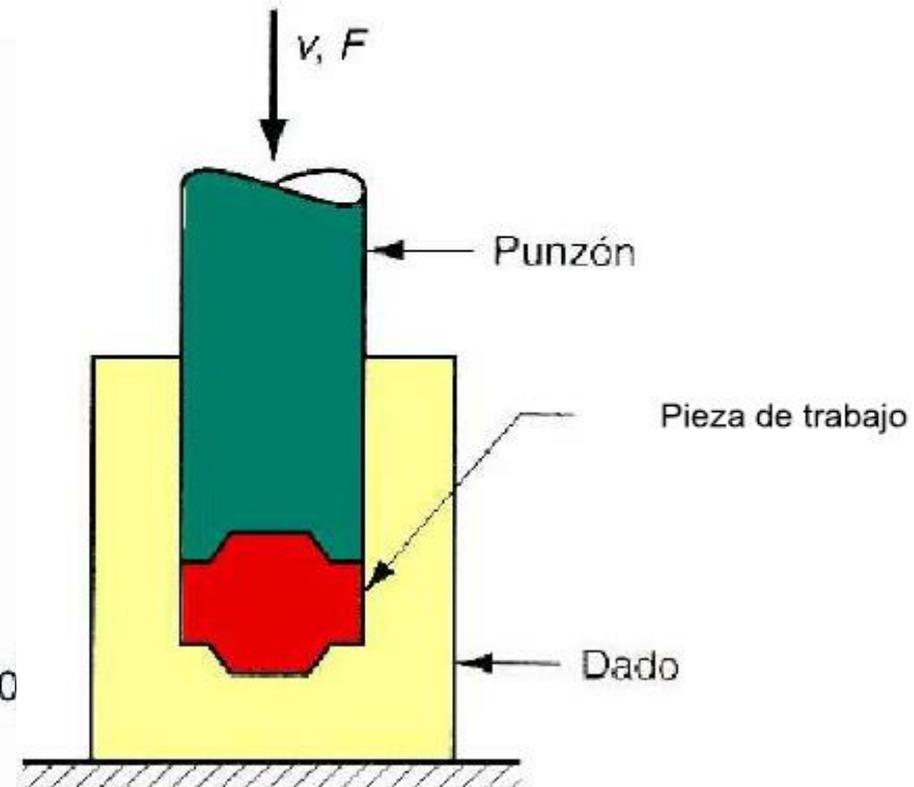
EL FORJADO ES UN PROCESO DE DEFORMACIÓN EN EL CUAL SE COMPRIME EL MATERIAL DE TRABAJO ENTRE DOS DADOS, USANDO UNA FUERZA DE IMPACTO O PRESIÓN GRADUAL PARA FORMAR LA PIEZA



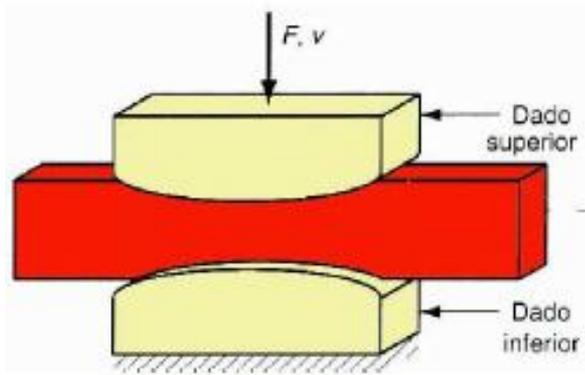
DADO ABIERTO



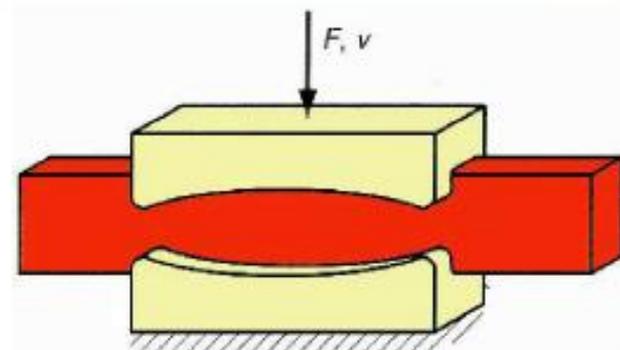
DADO CERRADO



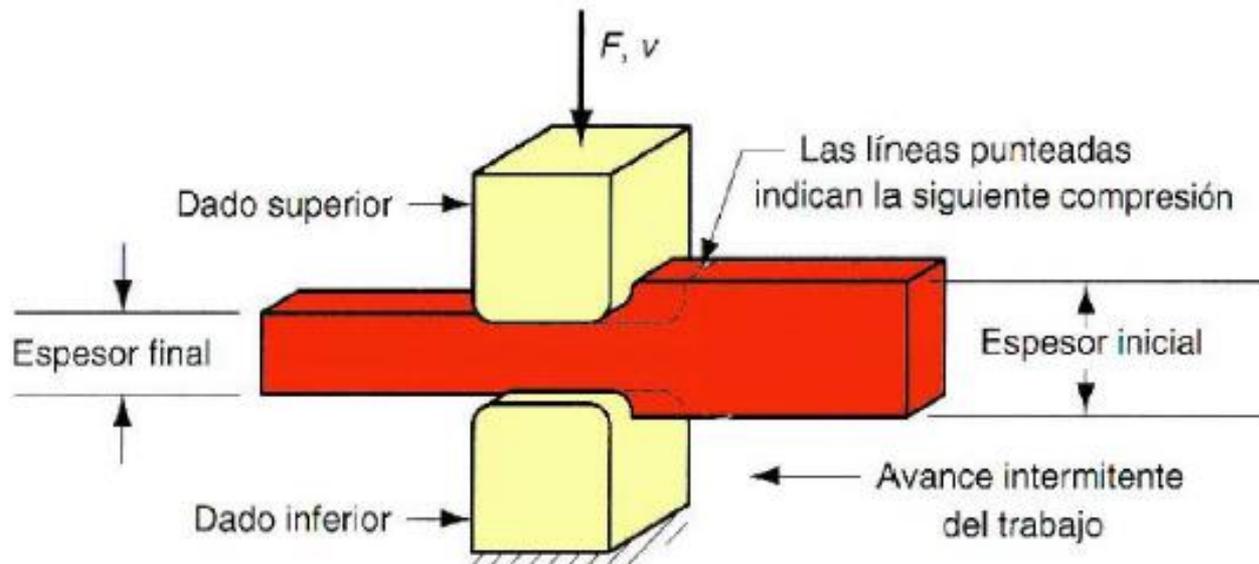
FORJA POR SECCIONES



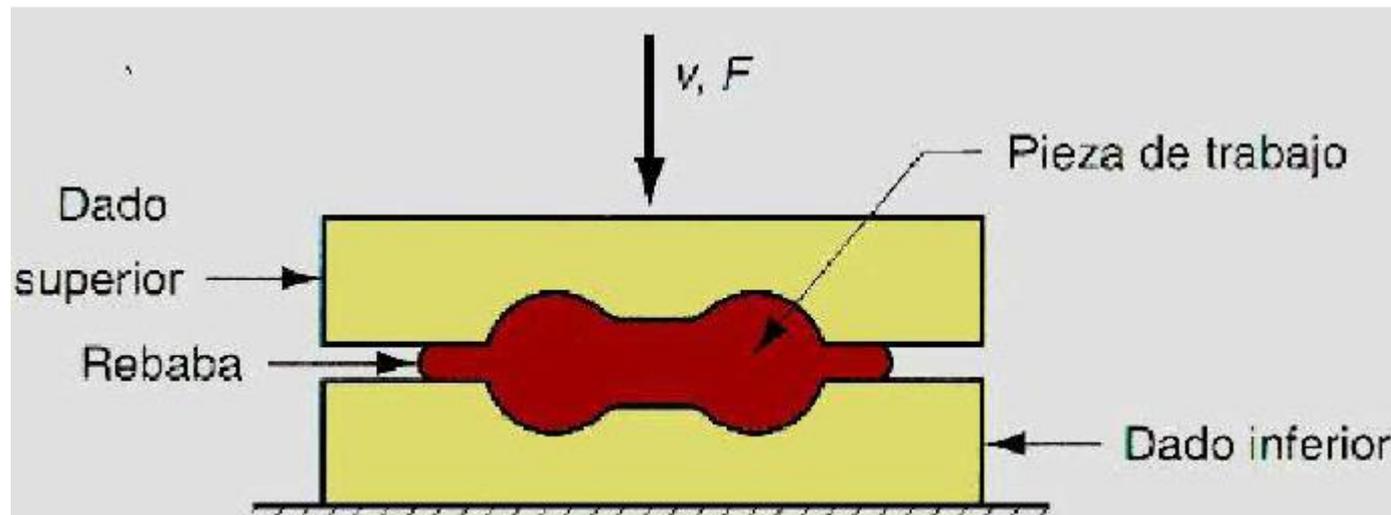
Dados convexos



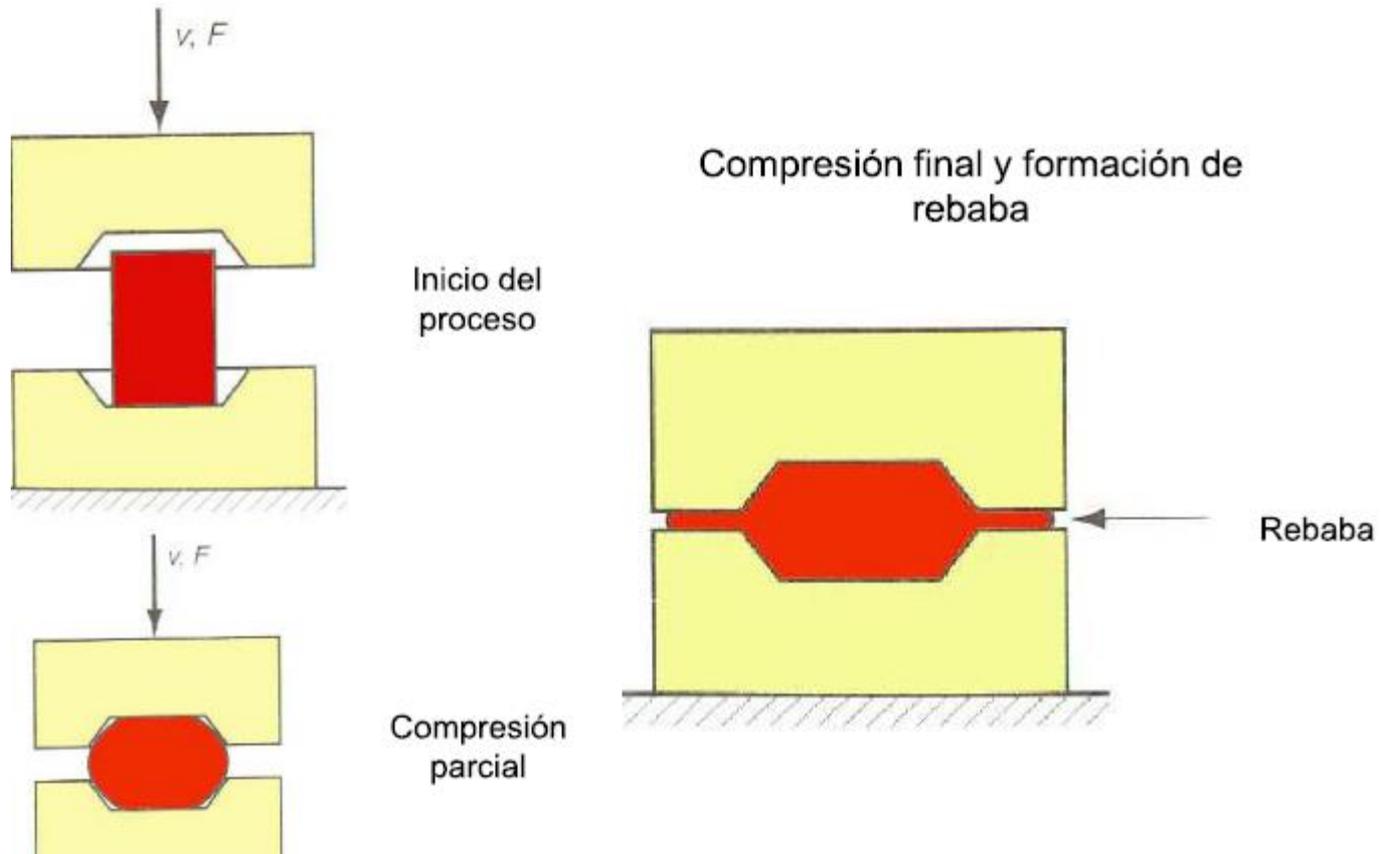
Dados cóncavos



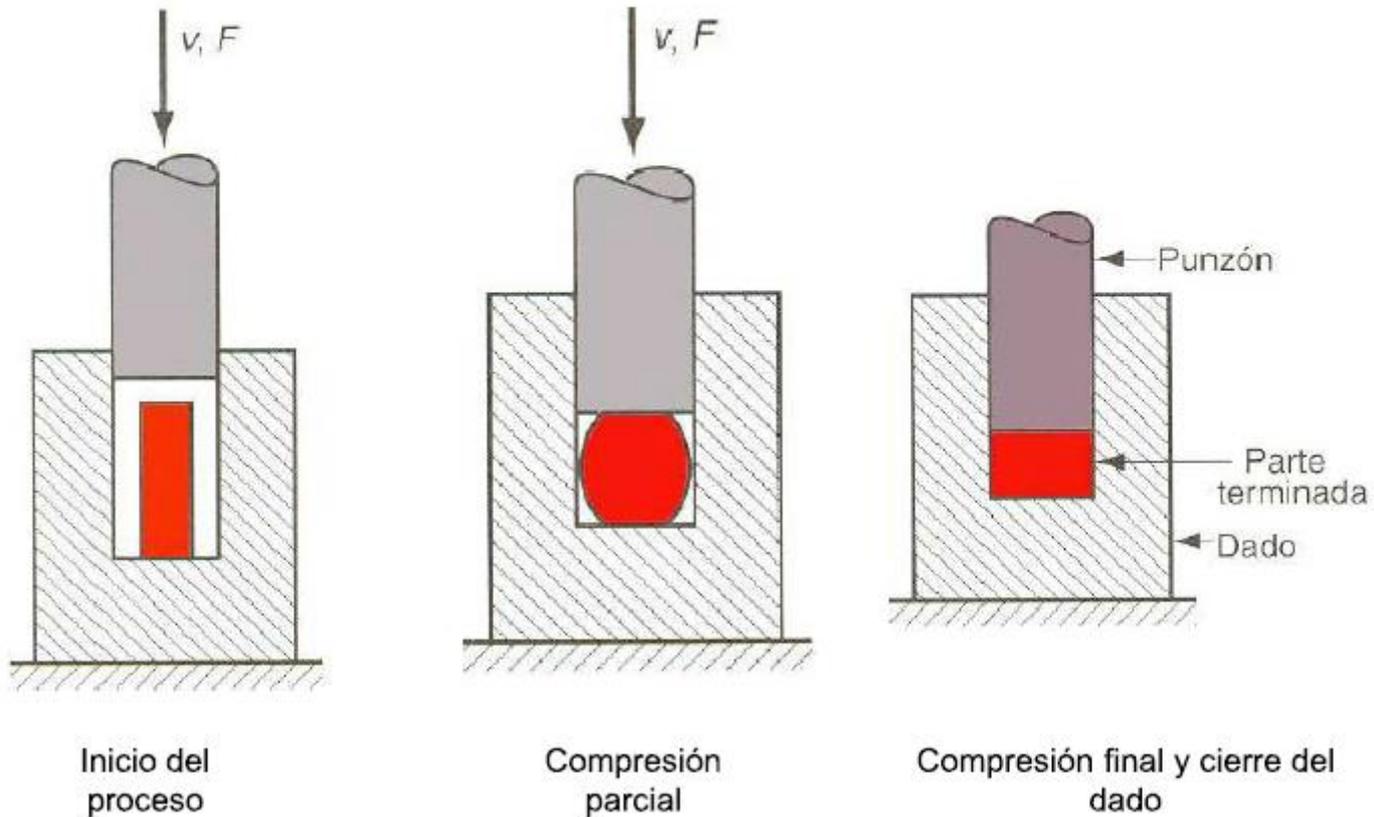
DADO IMPRESOR



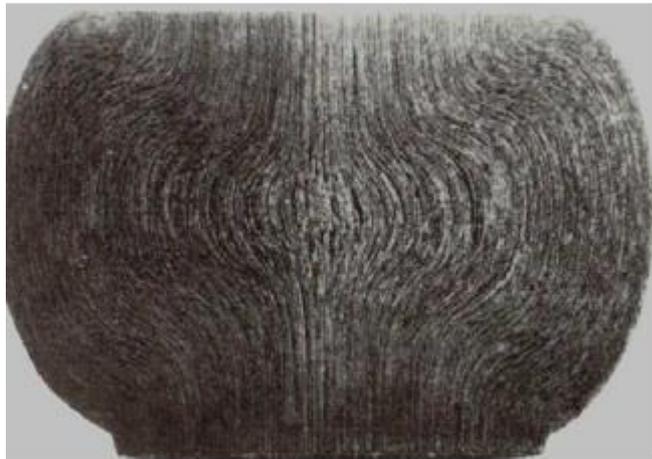
FORJA CON DADO IMPRESOR



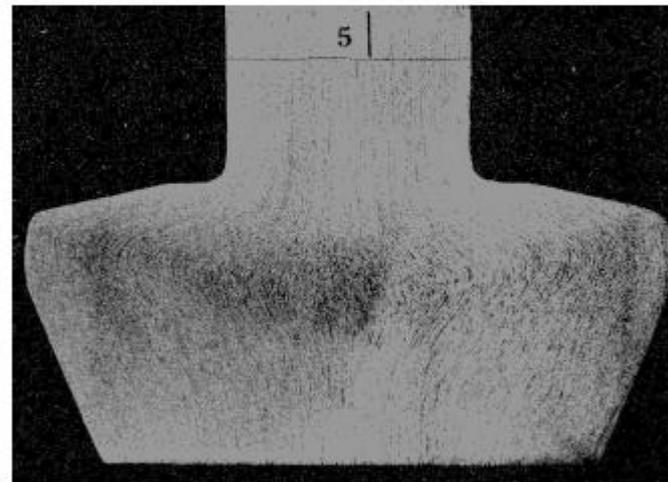
FORJA CON DADO CERRADO – FORJA SIN REBABA



Líneas de flujo en piezas forjadas

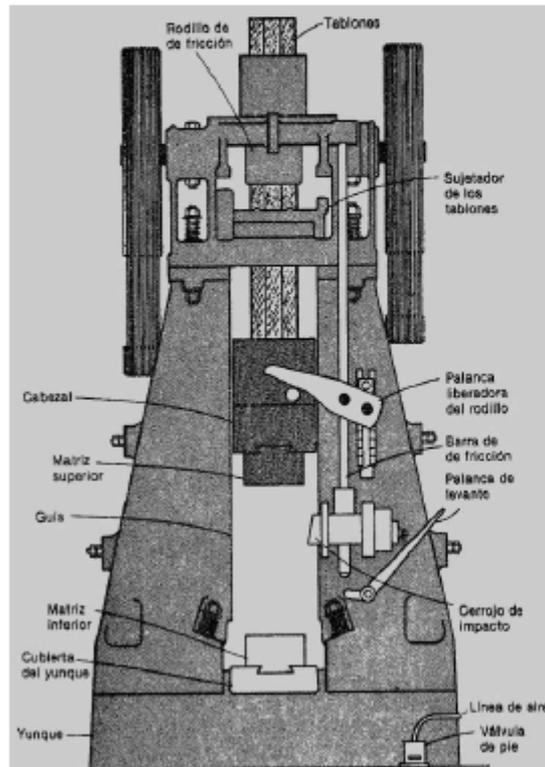


DADO ABIERTO

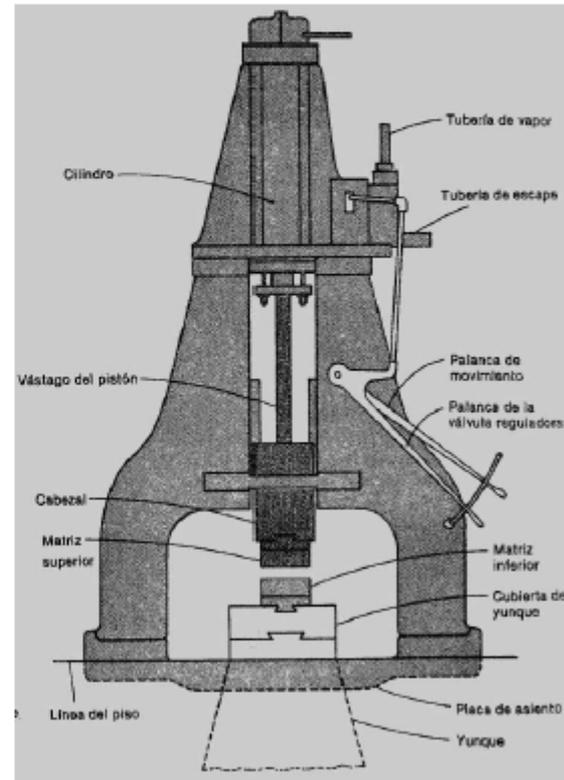


DADO CERRADO

EQUIPO EMPLEADO EN EL FORJADO DE METALES

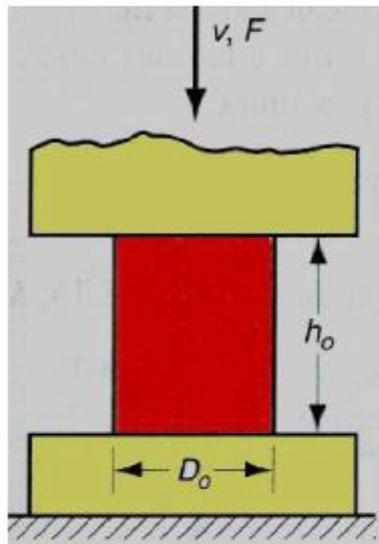


PRENSA

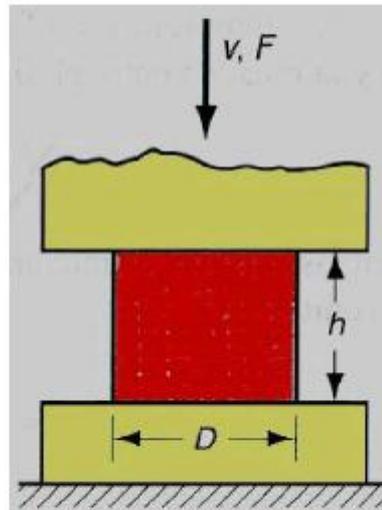


MARTINETE

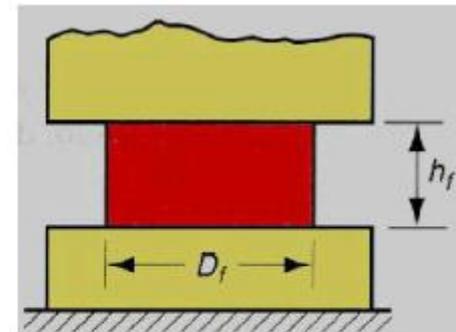
DEFOMACIÓN IDEAL (HOMOGÉNEA) EN FORJA CON DADO ABIERTO



INICIO DEL
PROCESO



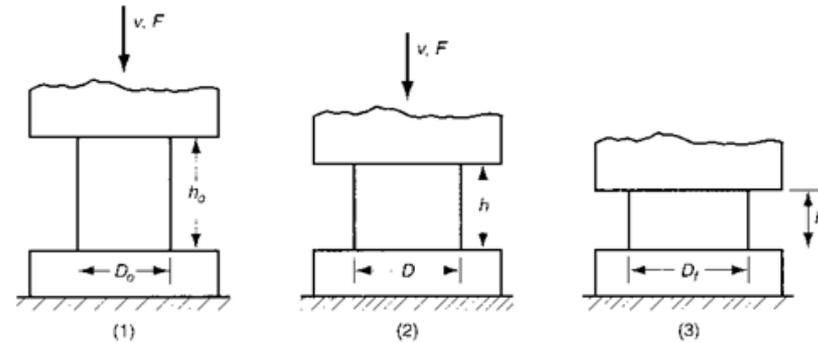
COMPRESIÓN
PARCIAL



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 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.



Bajo condiciones ideales, el esfuerzo real que experimenta el material durante el proceso, se puede determinar por: $\epsilon = \ln.h_0/h$

(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 = su valor final h_f , y el esfuerzo real alcanza su máximo valor.)

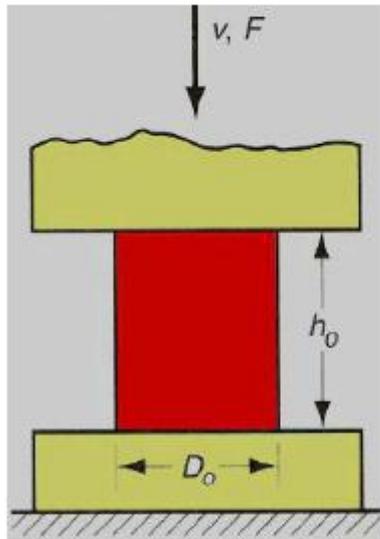
Se puede estimar la fuerza para ejecutar el recalcado. Se puede obtener la fuerza requerida para continuar la compresión a una altura dada h durante el proceso, multiplicando el área correspondiente de la sección transversal por el esfuerzo de fluencia: $F = \sigma_f \cdot A$

donde F = fuerza, (N); A = área de la sección transversal de la parte, (mm²); σ_f = esfuerzo de fluencia correspondiente al esfuerzo dado por la ecuación de ϵ , en MPa.

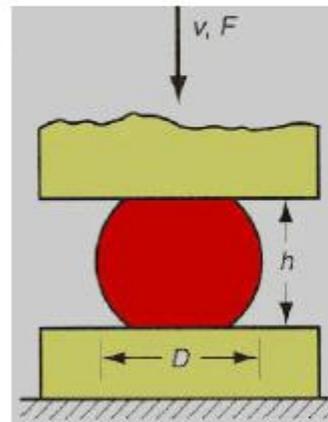
- a) El área A se incrementa continuamente al reducirse la altura durante la operación.
 - b) El esfuerzo de fluencia σ_f se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo, excepto cuando el metal es perfectamente plástico (trabajo en caliente).
 - c) En este caso, el exponente de endurecimiento por deformación $n = 0$, y el esfuerzo de fluencia σ_f iguala al esfuerzo de fluencia del metal σ .
 - d) 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.
 - e) Una operación real de recalado no ocurre exactamente como se mostró en la figura anterior, debido a que la fricción se opone al flujo de metal en la superficie de los dados.
 - f) Esto crea un efecto de abultamiento en forma de barril, llamado abarrilamiento, que se muestra en la siguiente figura.
- ❖ 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.

DEFOMACIÓN REAL (NO HOMOGÉNEA) EN FORJA CON DADO ABIERTO

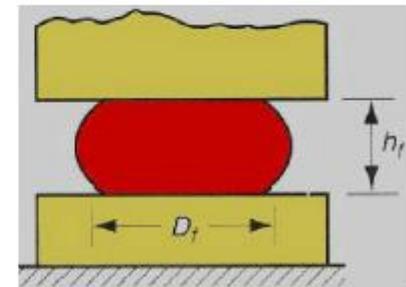
ABARRILAMIENTO



INICIO DEL
PROCESO



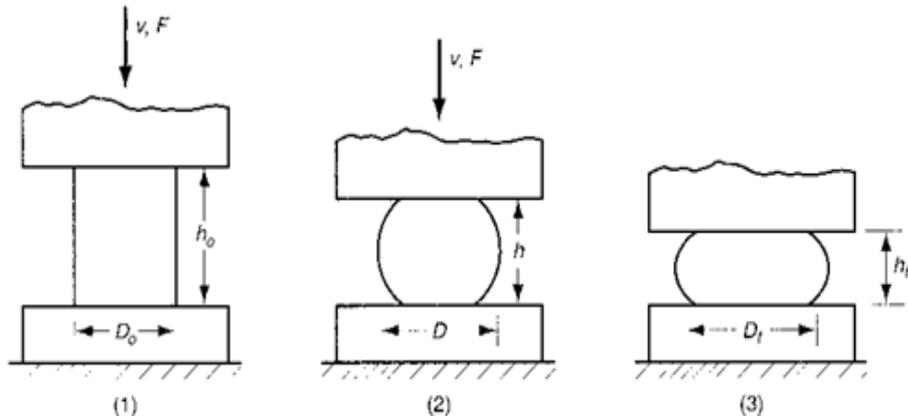
DEFOMACIÓN
PARCIAL



FORMA
FINAL

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 inter-fase dado-trabajo



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

$$F = K_f \cdot \sigma_f \cdot A$$

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

$$K_f = (0,4 \mu D) / (h + 1)$$

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); y h = altura de la parte, (mm).

Representa la condición real de la forja, debido a que la fricción se opone al flujo de material en la superficie del dado. Esto crea un abultamiento en forma de barril.

Esto origina que la fuerza de forjado sea más grande que la pronosticada anteriormente, esto se corrige mediante un factor de forma (K_f), que también toma en cuenta la relación diámetro y altura.

$$F = \sigma_c K_f A \quad \longrightarrow \quad K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h}$$

Donde: μ = coef. fricción; D = diámetro de la parte o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie; h = altura

Sustituyendo en la ecuación de la fuerza, todas las relaciones conocidas, queda:

$$\sigma_c = K \varepsilon^\eta \quad \varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$$

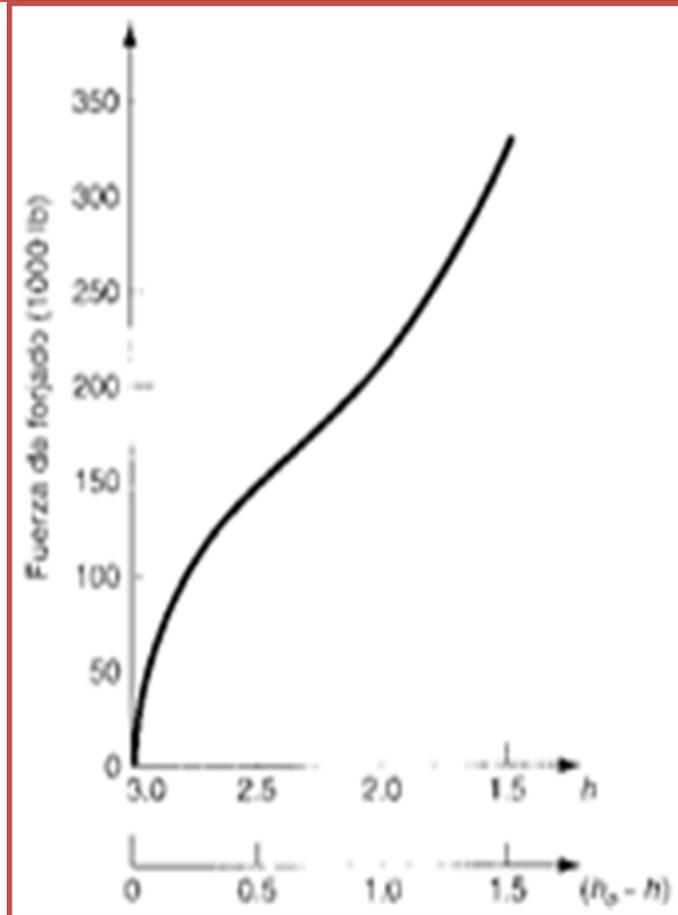
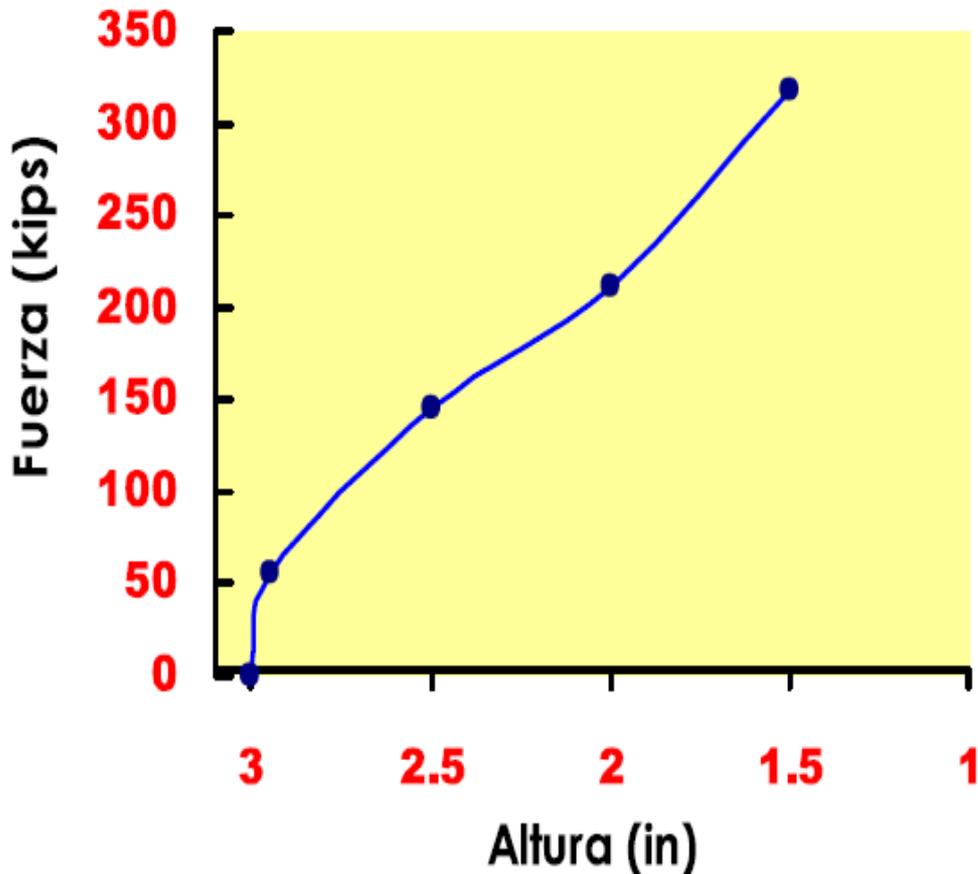
*) Coeficiente de endurecimiento por deformación = (η)

*) σ_c = esfuerzo de cedencia correspondiente a la deformación dada

$$F = K \left(\ln \frac{h_0}{h} \right)^\eta \left[1 + \frac{0.4\mu D}{h} \right] A$$

FUERZA REQUERIDA EN FORJA CON DADO ABIERTO

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



COEFICIENTE DE RESISTENCIA (K) Y

EXPONENTE DE ENDURECIMIENTO (η) POR DEFORMACIÓN

MATERIAL	Coef. K (MPa)	Exponente η
Aluminio puro	175	0.20
Aleaciones de Aluminio	240	0.15
Cobre puro	300	0.50
Bronce (Cu-Sn)	700	0.35
Acero bajo carbono(recocido)	500	0.25
Acero alto carbono (recocido)	850	0.15
Acero aleado (recocido)	700	0.15
Acero inoxidable (recocido)	1200	0.40
Latón (70%Cu-30%Zn)	500	0.41

Coeficientes de fricción y lubricantes empleados en el proceso de forja

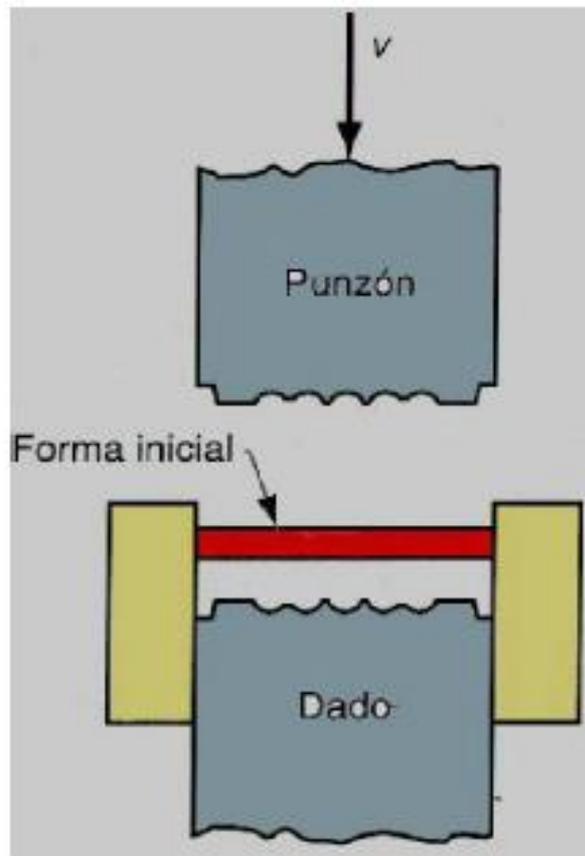
Material de la pieza de trabajo	Condición de operación	Lubricante	Coef. de fricción (μ)
Aleaciones de Pb, Sn y Zn	Frío	FO, MO	0.05
Aleaciones de Mg	Caliente	GR, MoS2	0.1-0.2
Aleaciones de Al	Caliente	GR, MoS2	0.1-0.2
	Frío	FA,MO	0.1
Aleaciones de Cu	Caliente	GR	0.1-0.2
	Frío	Jabón seco, cera o cebo	0.1
Aceros	Caliente	GR	0.1-0.2
	Frío	EP,MO	0.1-0.05
Aceros inoxidables y aleaciones de Ni	Caliente	GR	0.1-0.2
	Frío	CL, MO	0.1-0.05
Aleaciones de Ti	Caliente	GL,GR	0.2
	Frío	Jabón o MO	0.1

CL = Parafina clorada ; EP = Compuestos de extrema presión ; FA = Ácidos grasos
FO = Aceites grasos ; GR = Grafito ; GL = Vidrio ; MO = Aceite mineral

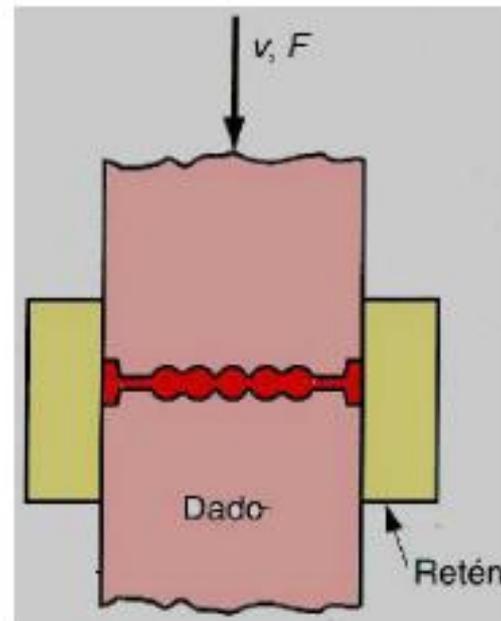
VALORES TÍPICOS DE K_f PARA VARIAS FORMAS DE FORJADO EN DADO IMPRESOR Y CERRADO

DADO IMPRESOR	COEF. DE FORMA K_f
FORMAS SIMPLES	6.0
FORMAS COMPLEJAS	8.0
FORMAS MUY COMPLEJAS	10.0
DADO CERRADO	COEF. DE FORMA K_f
ACUÑADO	6.0
FORMAS COMPLEJAS	8.0

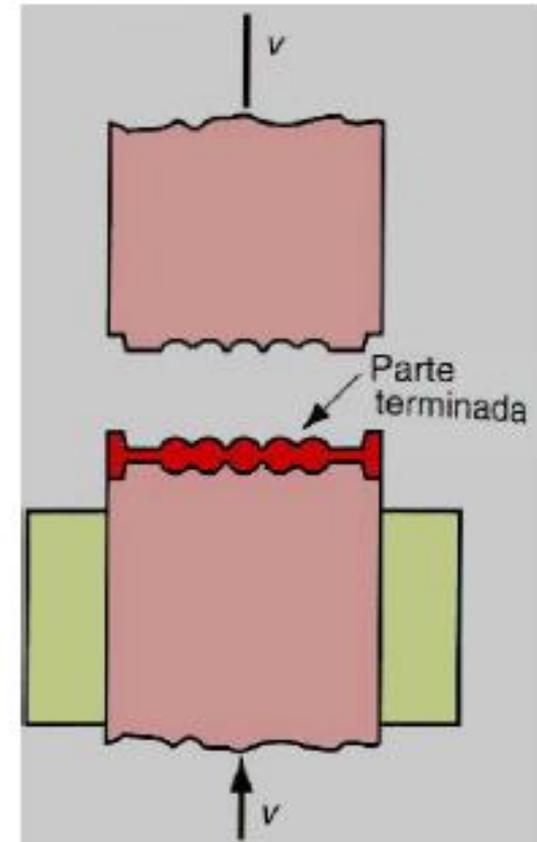
OPERACIÓN DE ACUÑADO



Inicio del ciclo

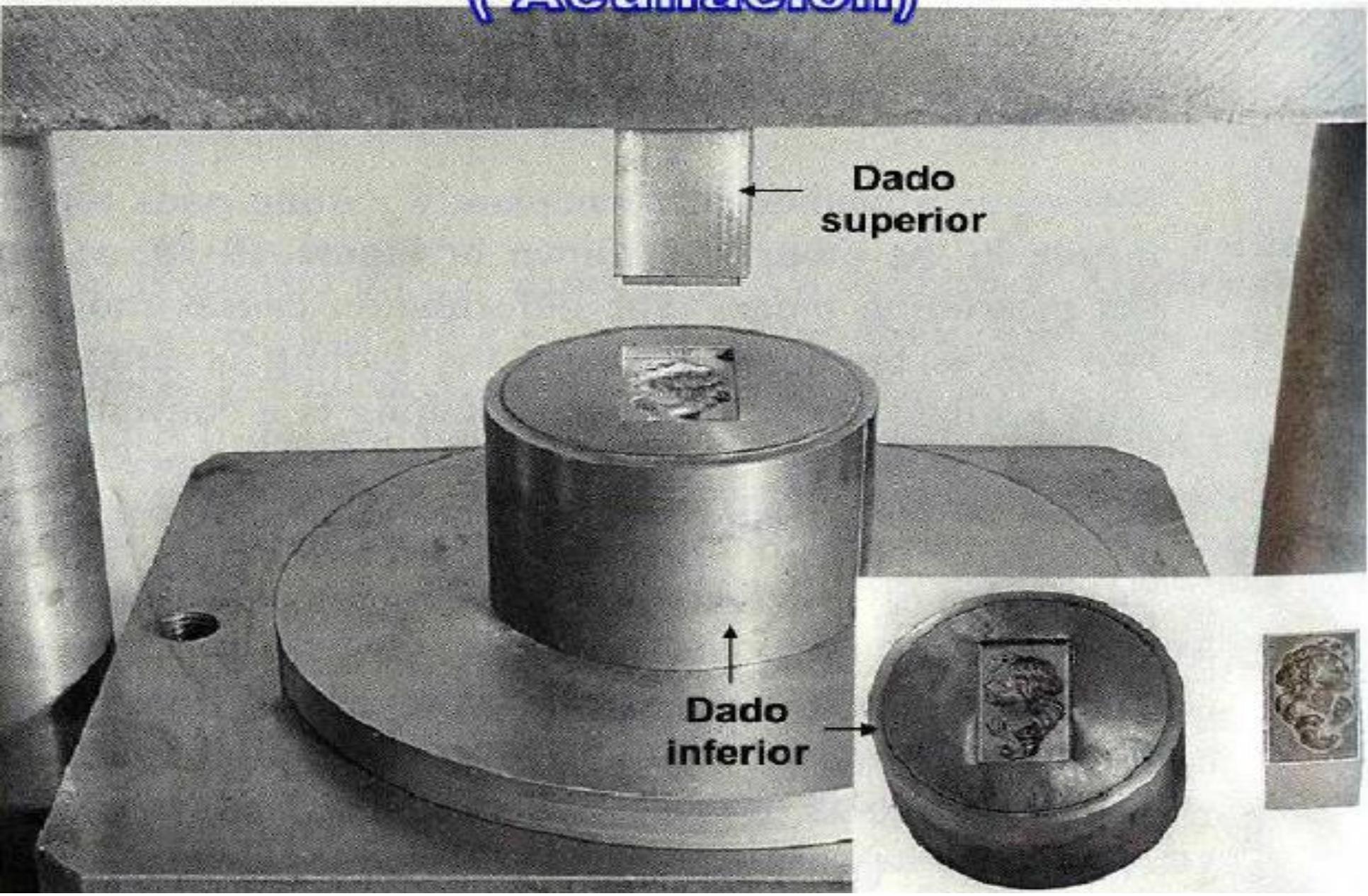


Tiempo de
compresión



Remoción de la
parte

Forja en dado impresor (Acuñaación)



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 que en el 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 16 para el forjado en dado abierto, pero su interpretación es ligeramente diferente:

$$F = K_f \cdot \sigma_f \cdot A$$

donde F = fuerza máxima en la operación (N); A = área proyectada de la parte, incluyendo la rebaba, (mm^2); σ_f = esfuerzo de fluencia del material (MPa); y K_f = factor de forma del forjado.

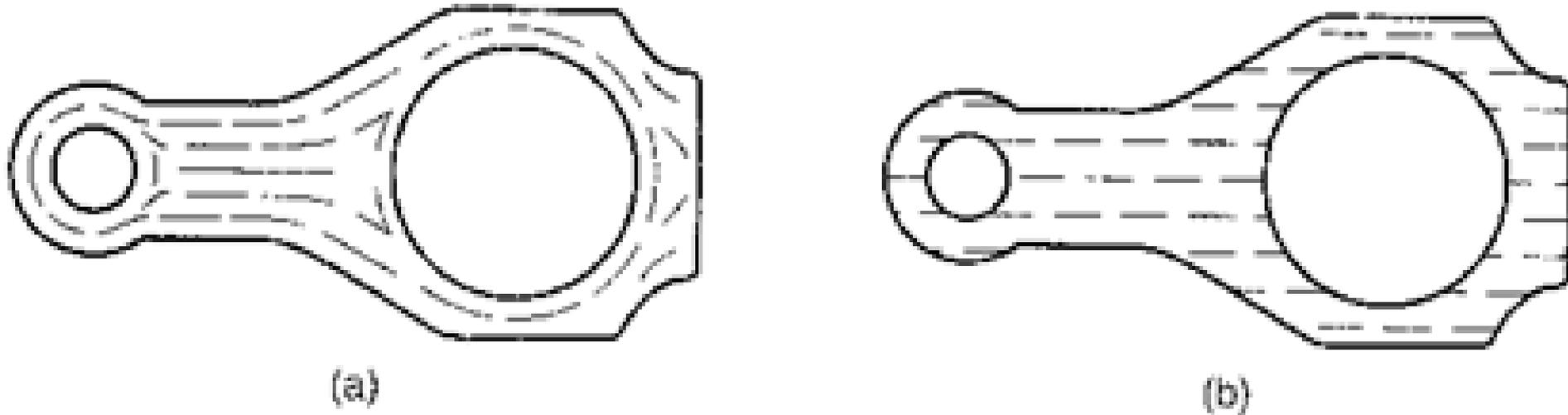
En el forjado en caliente, el valor apropiado de σ_f es la resistencia a la fluencia del metal a temperatura elevada.

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 anterior, K_f es un factor con el que se intenta tomar en cuenta el incremento de la fuerza requerida para forjar formas complejas.

Las ventajas del forjado sobre el maquinado completo de la parte son: velocidades de producción más altas, conservación del metal, mayor resistencia y orientación más favorable de los granos de metal.

En la figura se ilustra una comparación del flujo granular en el forjado y en el maquinado.



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

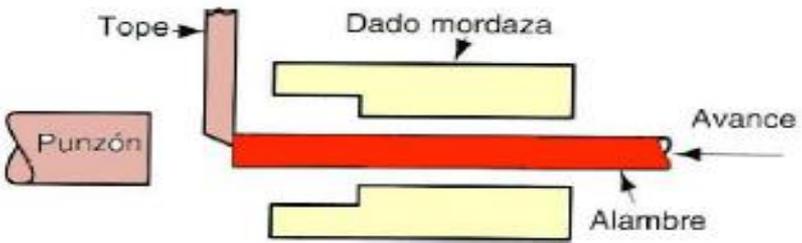
Los mejoramientos de la tecnología del forjado con dado impresor han tenido como resultado la capacidad de producir forjados con secciones más delgadas, formas más complejas, reducción drástica de los requerimientos de ahusamiento en los dados, tolerancias más estrechas y la virtual eliminación de concesiones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

Los procesos de forjado con estas características se conocen como forjado de precisión.

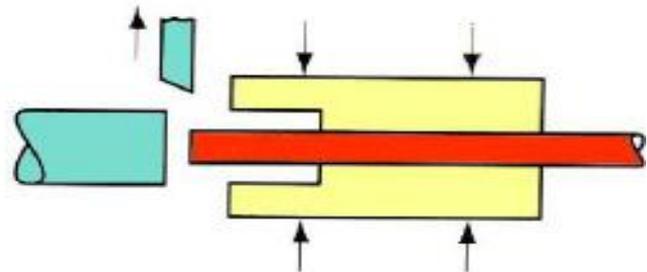
Además de las operaciones convencionales de forja descritas en las secciones anteriores hay otras operaciones de formado de metal que se asocian muy cerca con el forjado.

RECALCADO. 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.

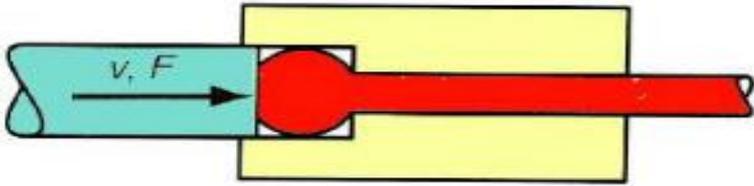
Sin embargo, es una operación industrial que puede también ejecutarse como un forjado en dado cerrado como se observa en la figura.



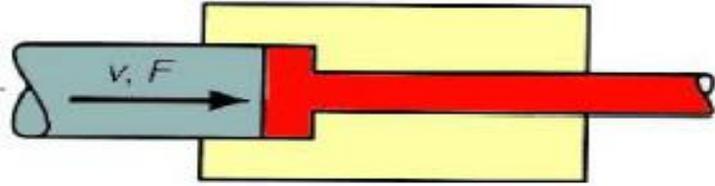
Alimentación del alambre hasta el tope



Cierre dados mordaza sobre el alambre y retiro del tope



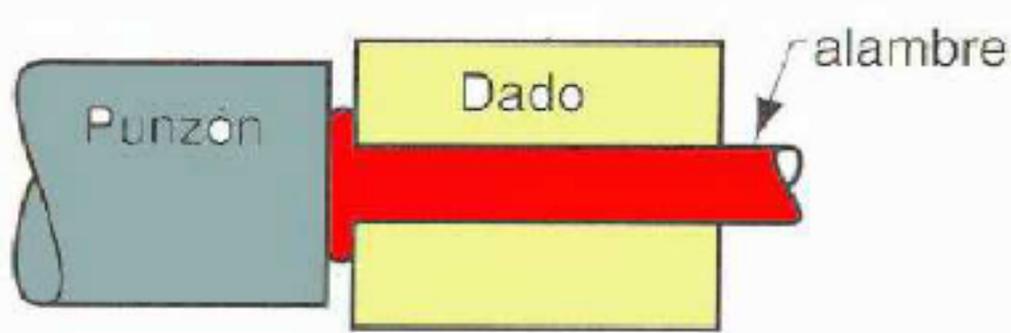
Avance del punzón



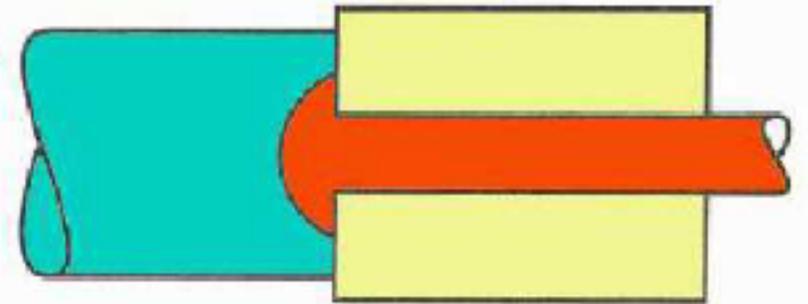
Formación de la cabeza

TIPOS DE CABEZAS

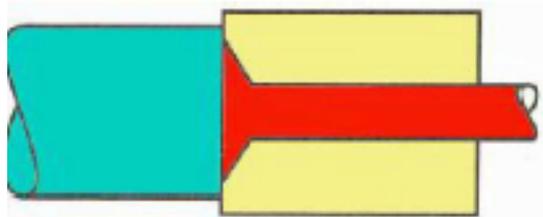
(ELABORADAS POR RECALCADO)



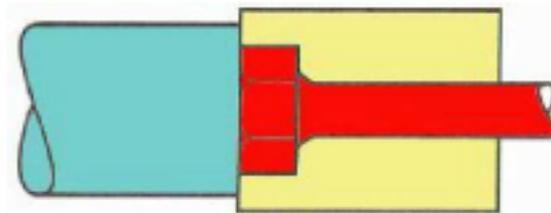
Cabeza para clavo



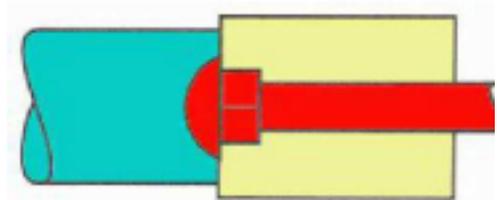
Cabeza redonda



Cabeza plana

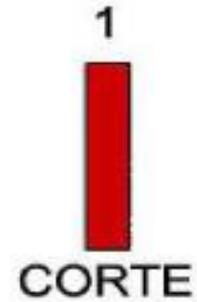
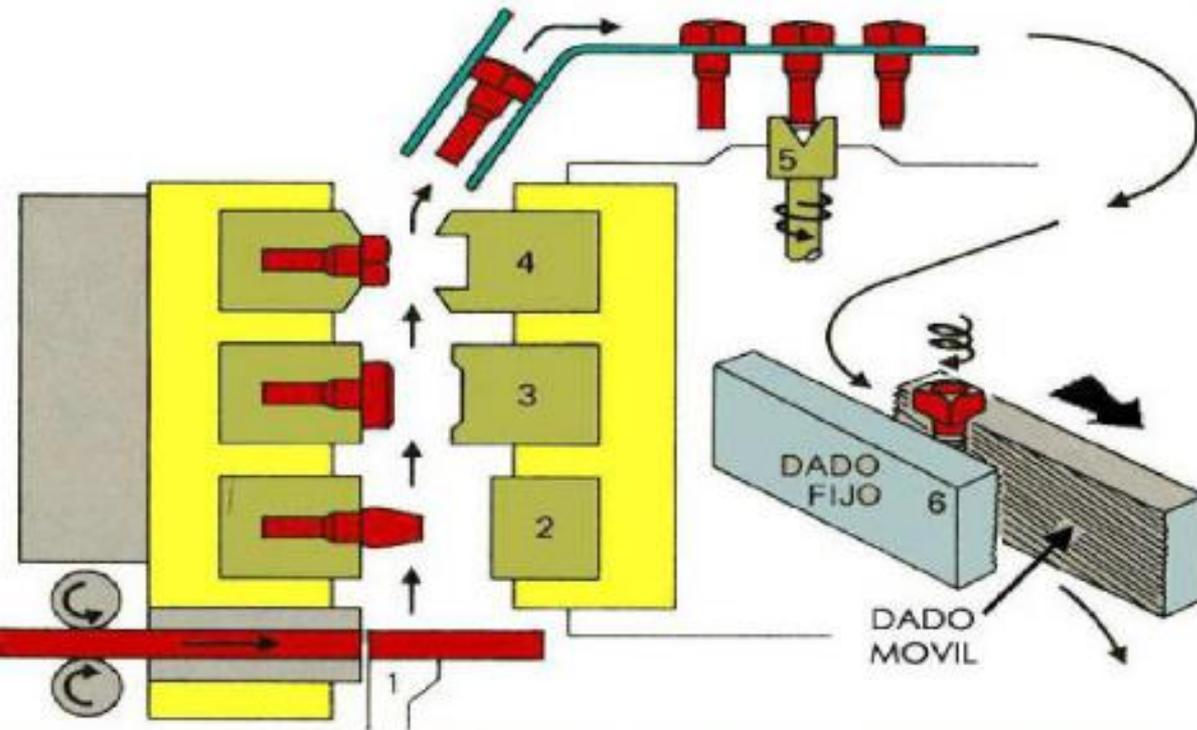


Cabeza Aleen

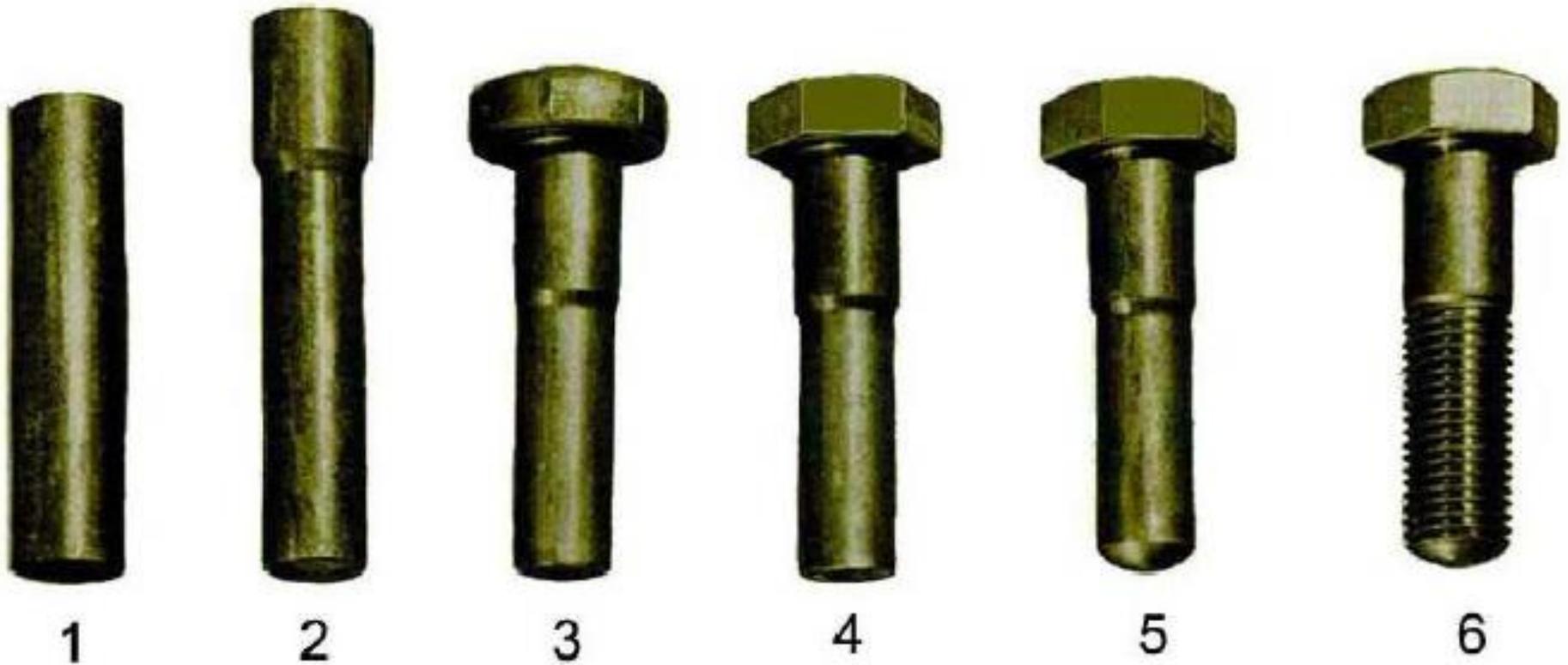


Cabeza automotriz

MANUFACTURA DE TORNILLOS



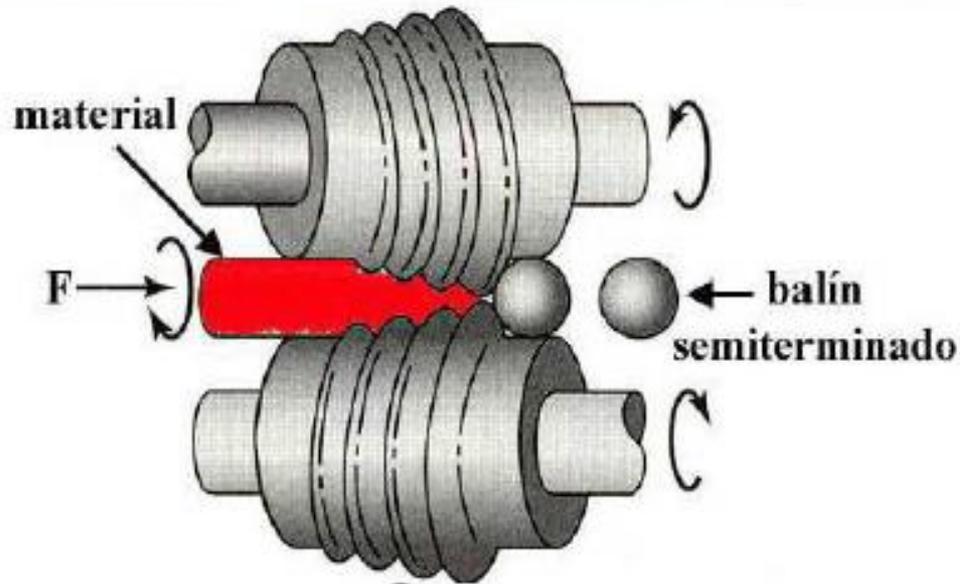
SECUENCIA EN LA MANUFACTURA DE TORNILLOS



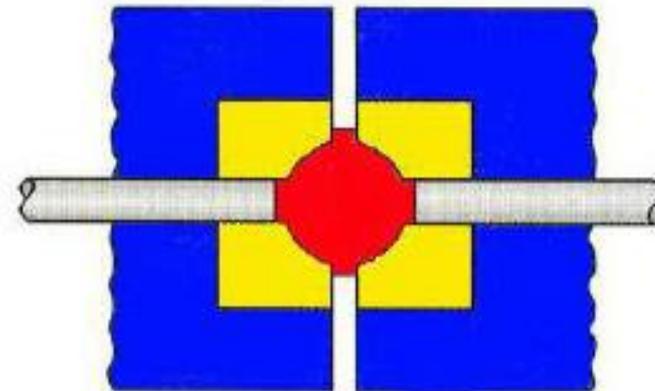
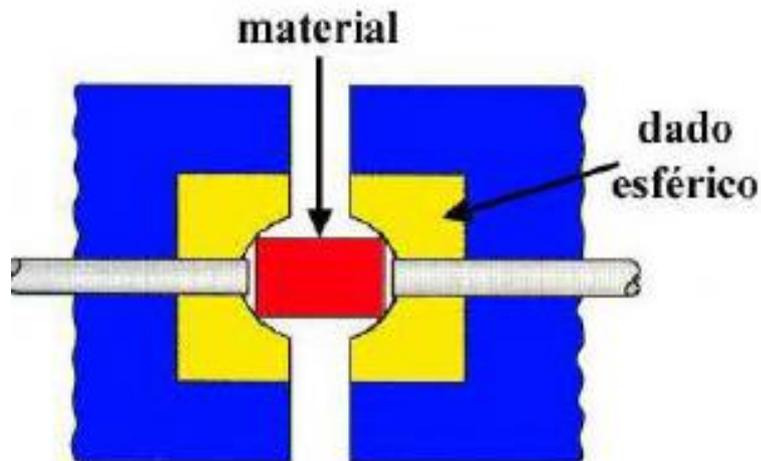
PROCESO DE MAQUINADO vs FORJA (DESPERDICIO DE MATERIAL)



MANUFACTURA DE BALINES

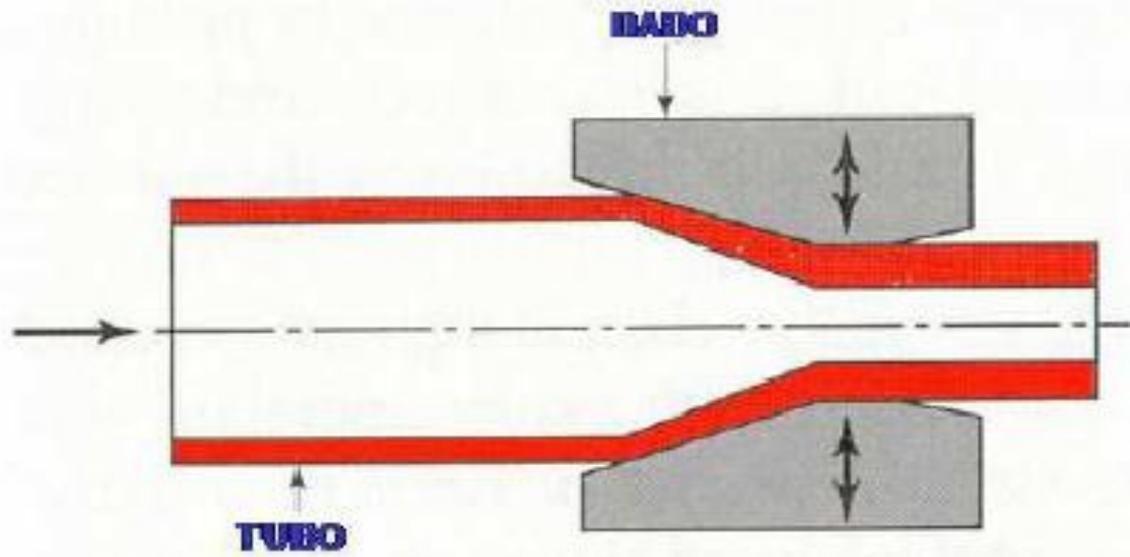


**FORJA
ROTATORIA**

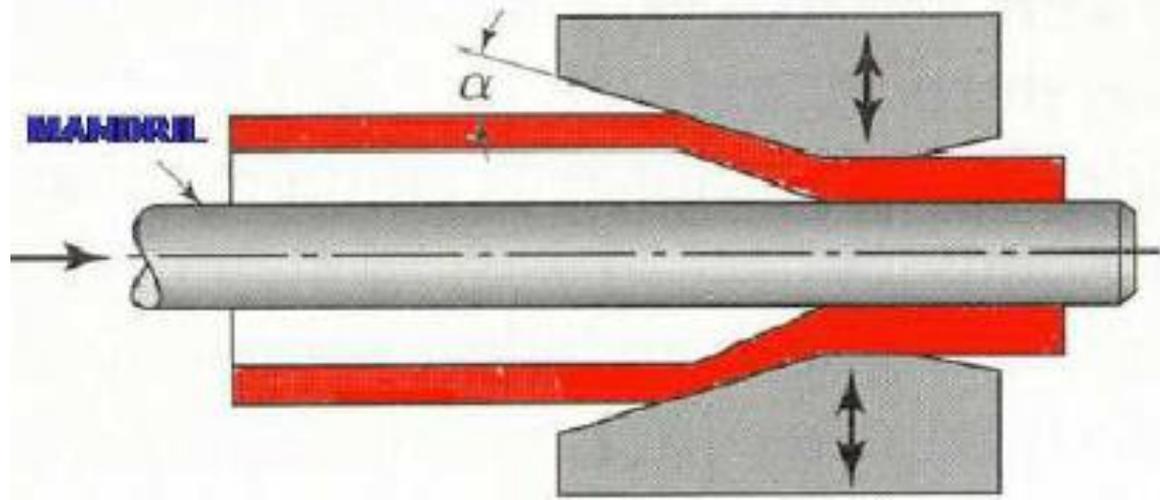


FORJA POR COMPRESIÓN

SUAJEADO (SWAGING) Ó FORJA ROTATORIA PARA LA REDUCCIÓN DE DIÁMETRO EN TUBOS

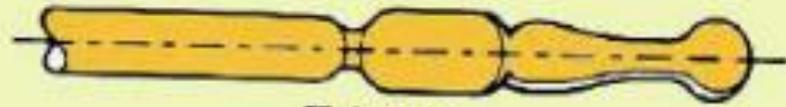


SIN MANDRIL



CON MANDRIL

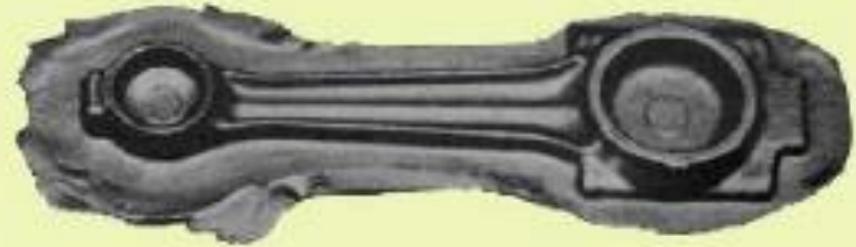
SECUENCIA PARA EL FORJADO DE UNA BIELA



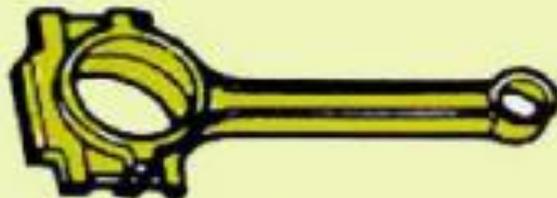
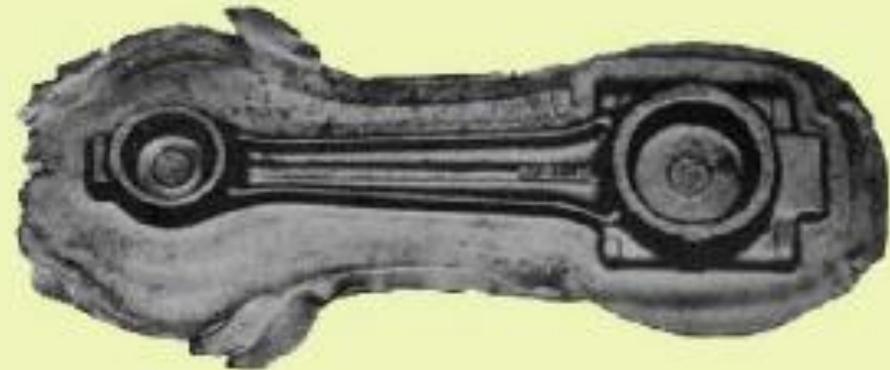
Edging



Blocking



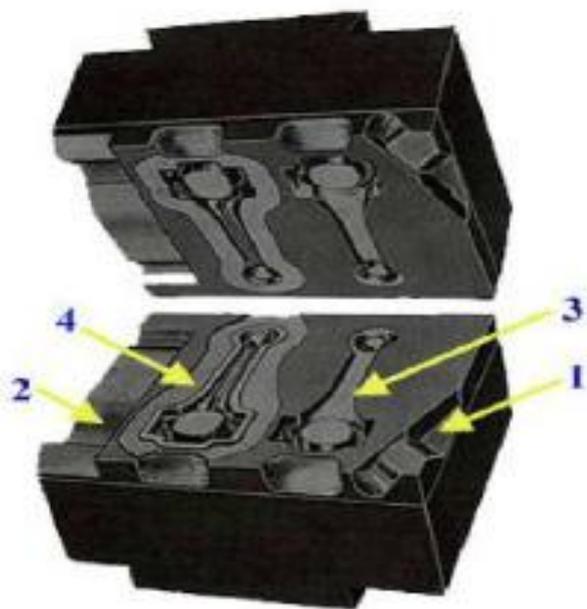
Finishing



Trimming



SECUENCIA PARA EL FORJADO DE UNA BIELA



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).

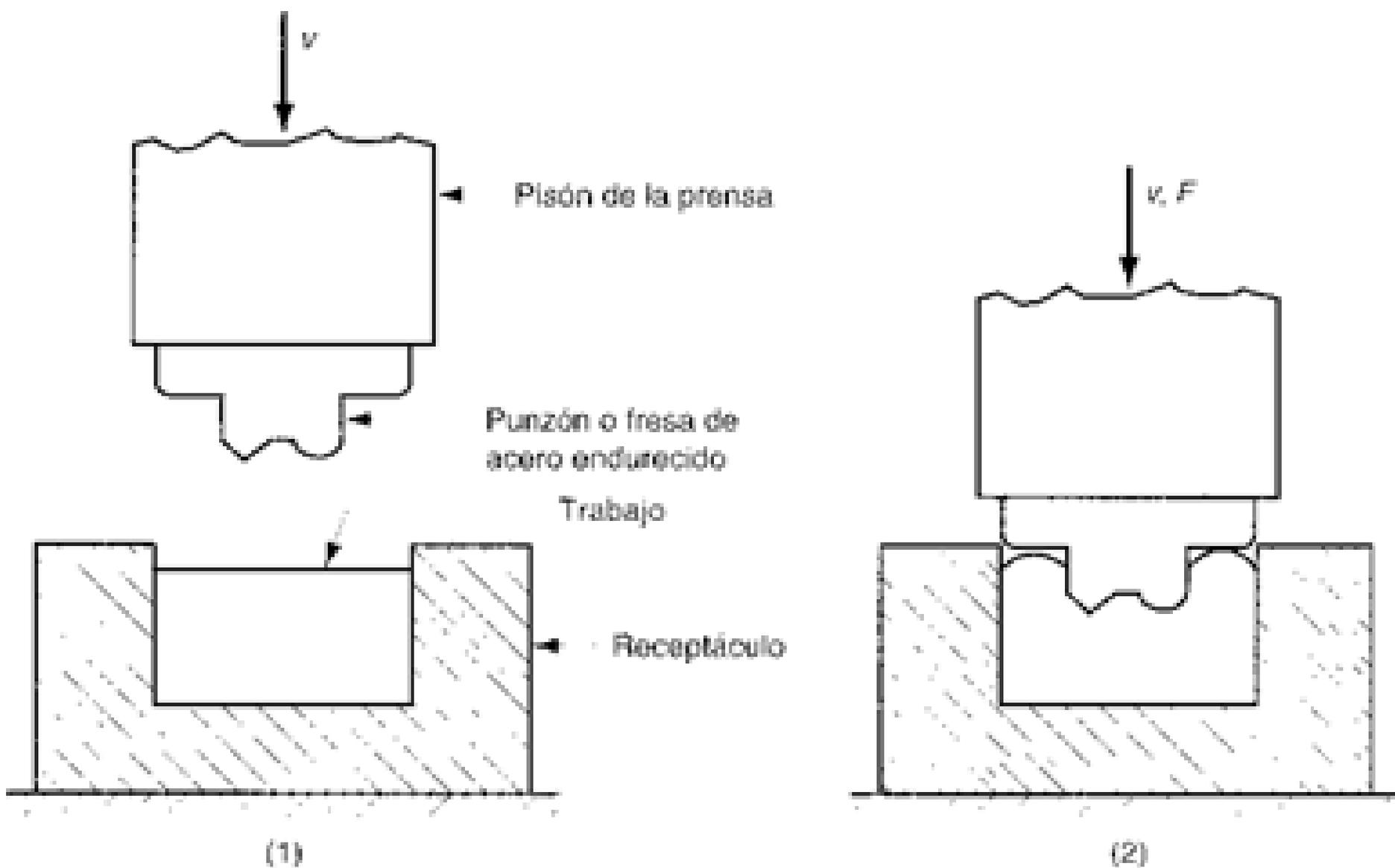
El proceso se usa frecuentemente para hacer cavidades de moldes para moldeo de plásticos y fundición en dados, como se muestra en la figura siguiente.

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.

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.



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.

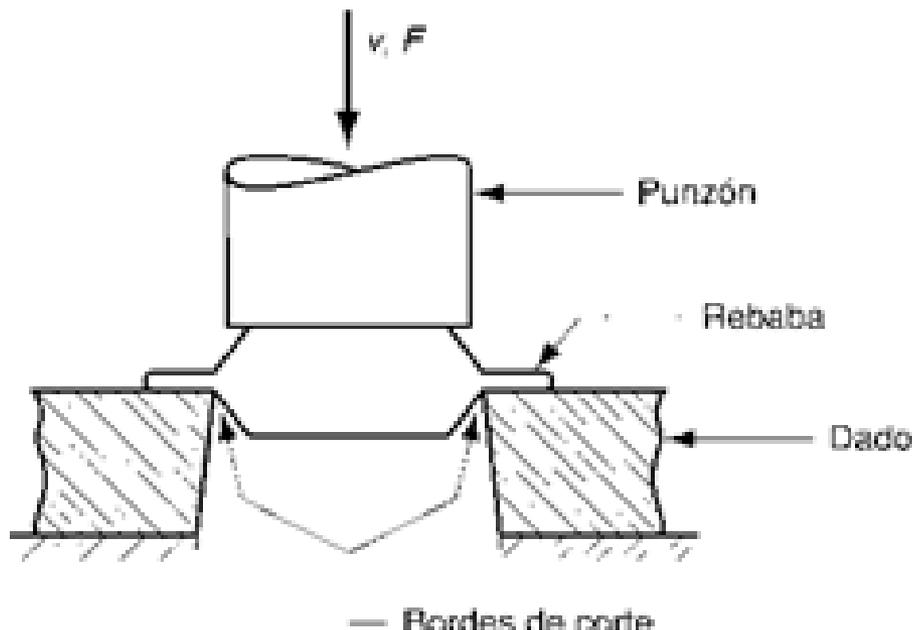
RECORTADO

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, en la cual un punzón fuerza el trabajo a través de un dado de corte, cuyo contorno tiene el perfil de la parte deseada.

El recorte se hace usualmente mientras el trabajo está aún caliente, esto significa que se debe incluir una prensa de recortado separada por cada martinete o prensa.

En los casos donde el trabajo podría dañarse por el proceso de corte, el recorte puede hacerse por medios alternativos, como esmerilado o aserrado.



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

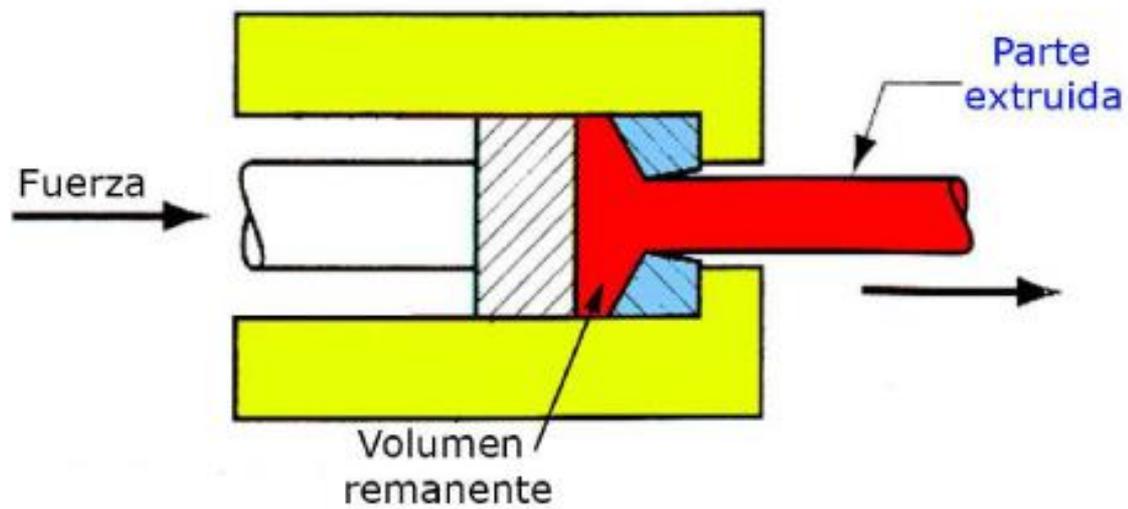
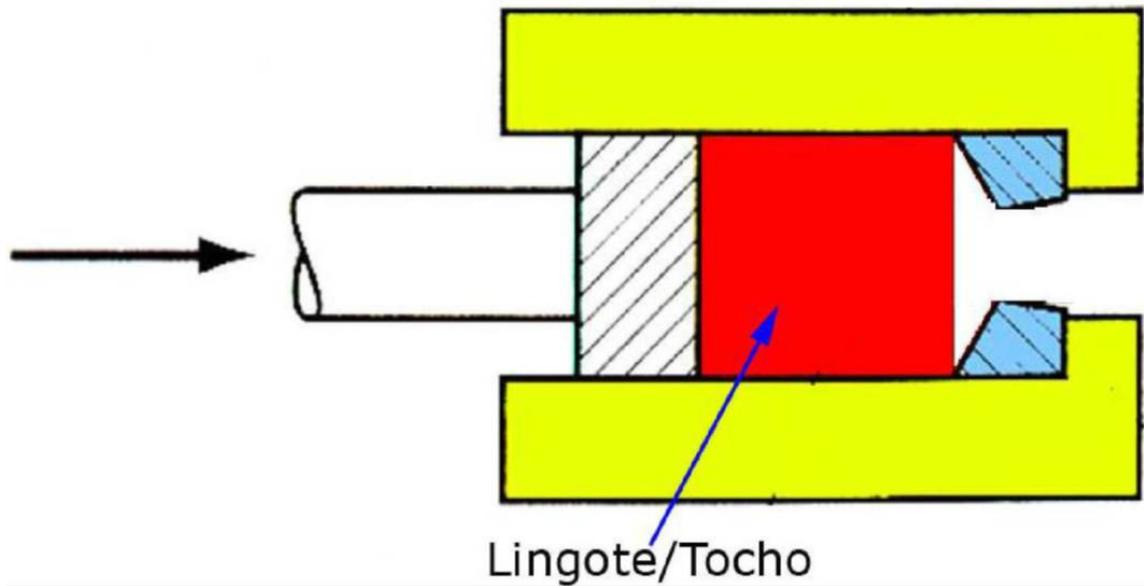
PROCESO DE EXTRUSIÓN



La extrusión es un proceso de formado por compresión en el cual el metal de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un dado para darle forma a su sección transversal.

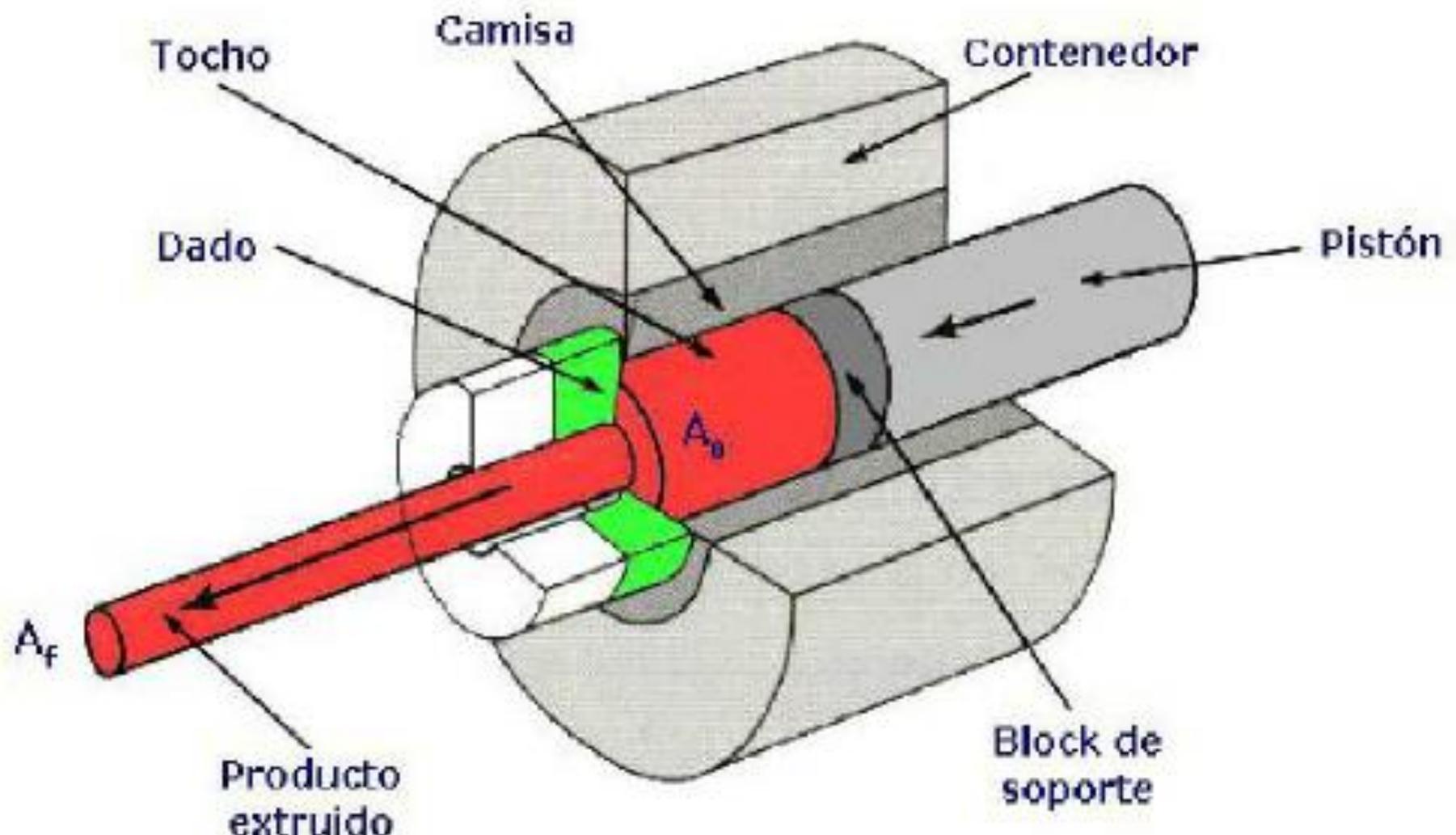
El proceso puede parecerse a apretar un tubo de pasta de dientes. Las ventajas de los procesos modernos incluyen:

- 1) Se puede extruir una gran variedad de formas, especialmente con extrusión en caliente; sin embargo, una limitación de la geometría es que la sección transversal debe ser la misma a lo largo de toda la parte.
- 2) La estructura del grano y las propiedades de resistencia se mejoran con la extrusión en frío o en caliente.
- 3) Son posibles tolerancias muy estrechas, en especial cuando se usa extrusión en frío.
- 4) En algunas operaciones de extrusión se genera poco o ningún material de desperdicio.

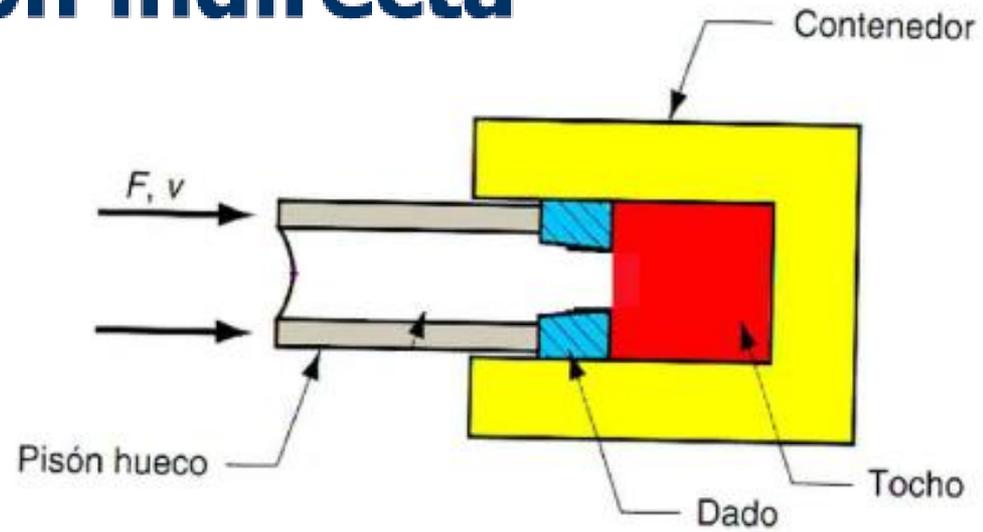


Al final de la extrusión

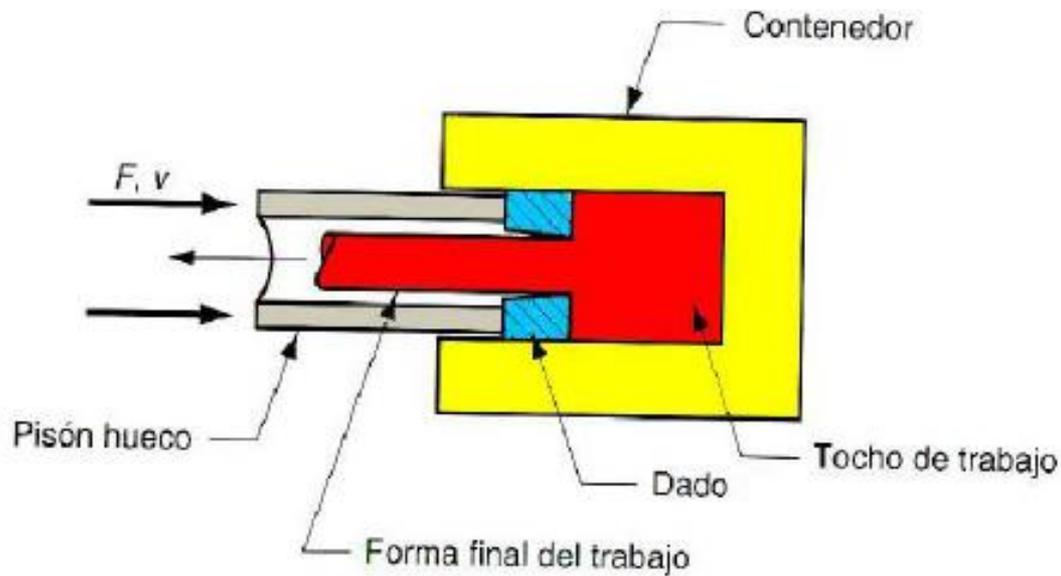
EXTRUSIÓN DIRECTA



Proceso de extrusión indirecta

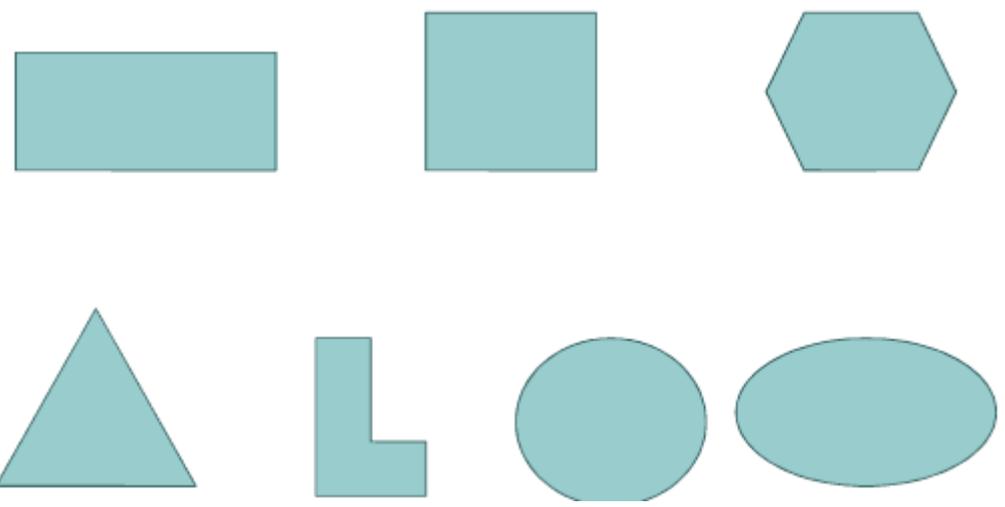
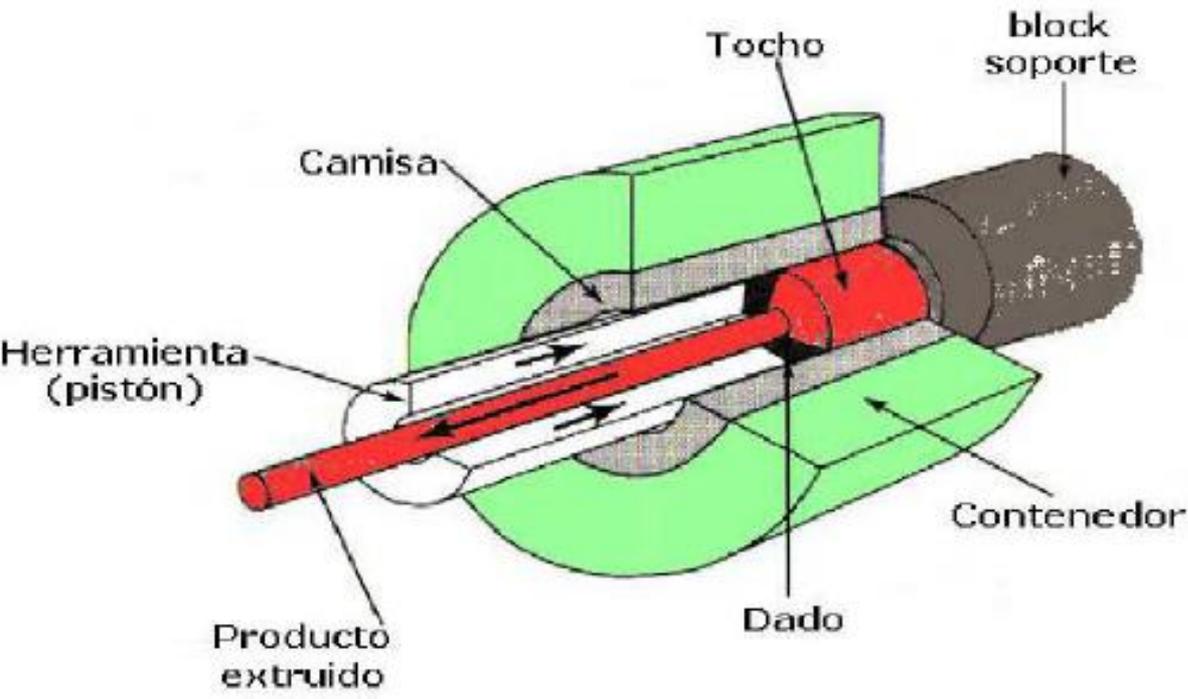


Al inicio de la extrusión

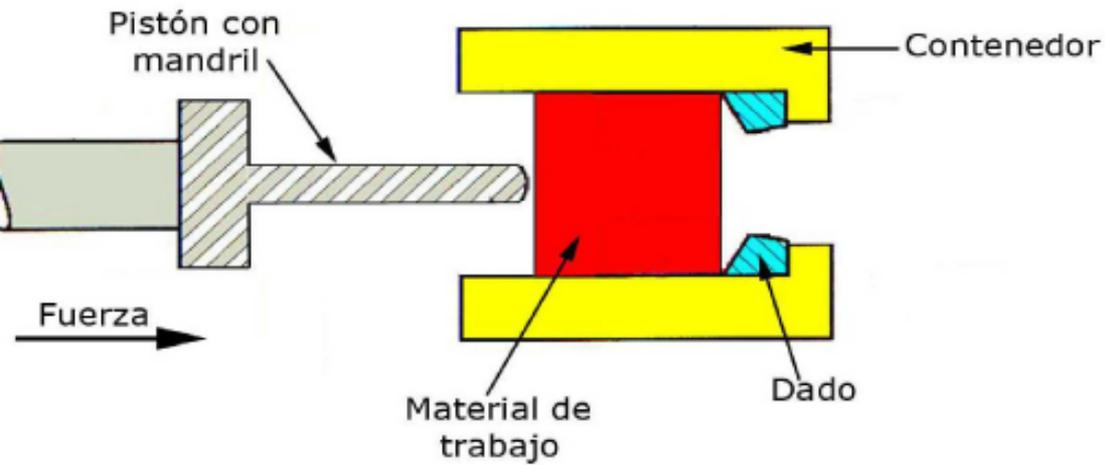


Al final de la extrusión

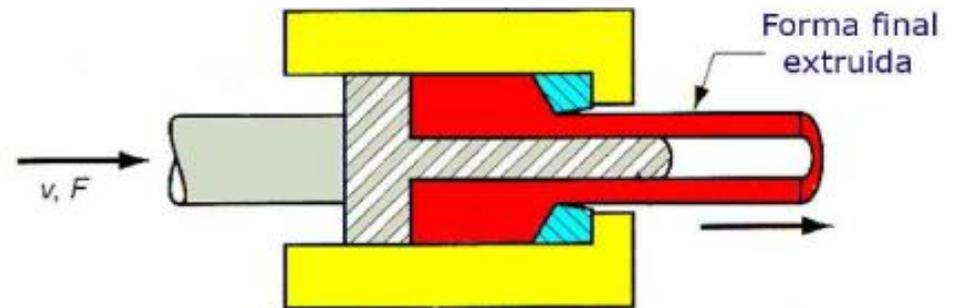
EXTRUSIÓN INDIRECTA



Extrusión directa para obtener partes huecas

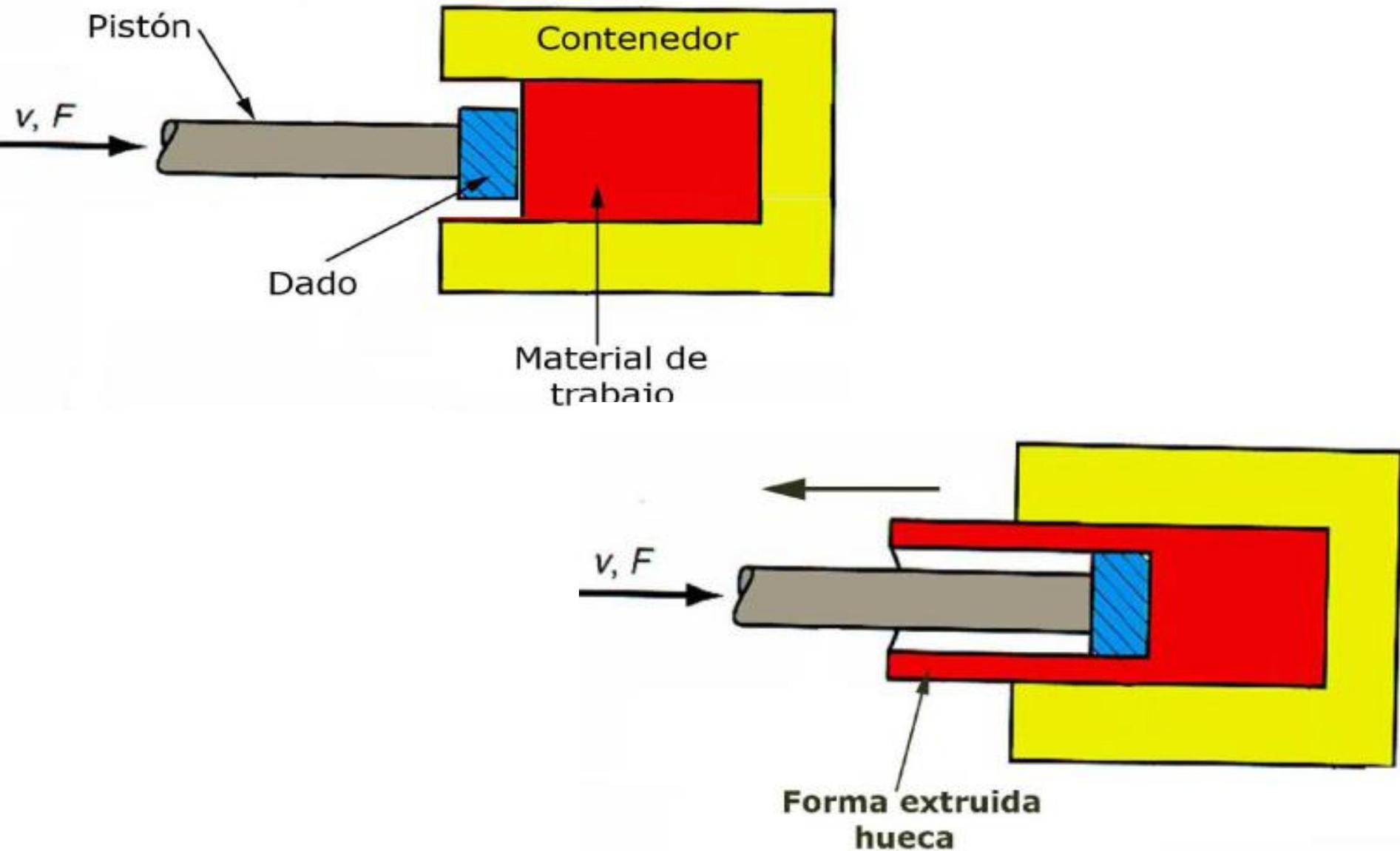


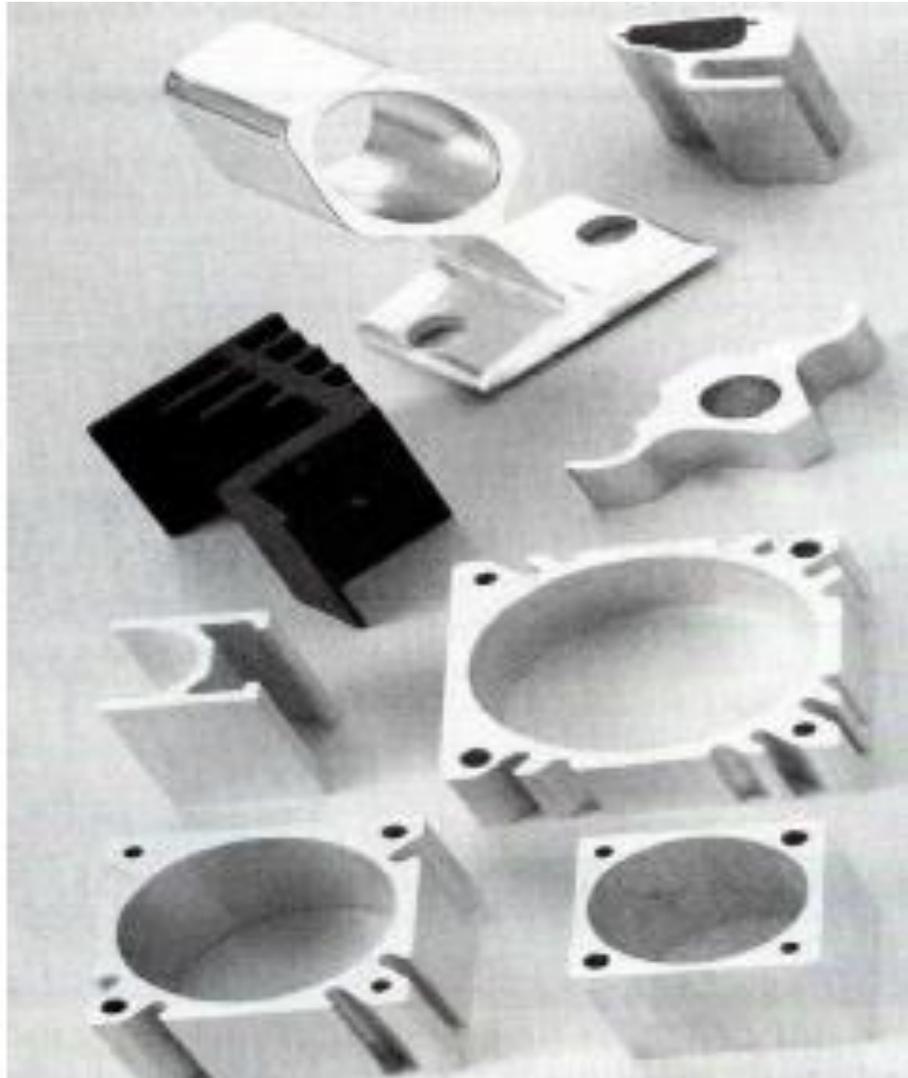
Al inicio de la extrusión



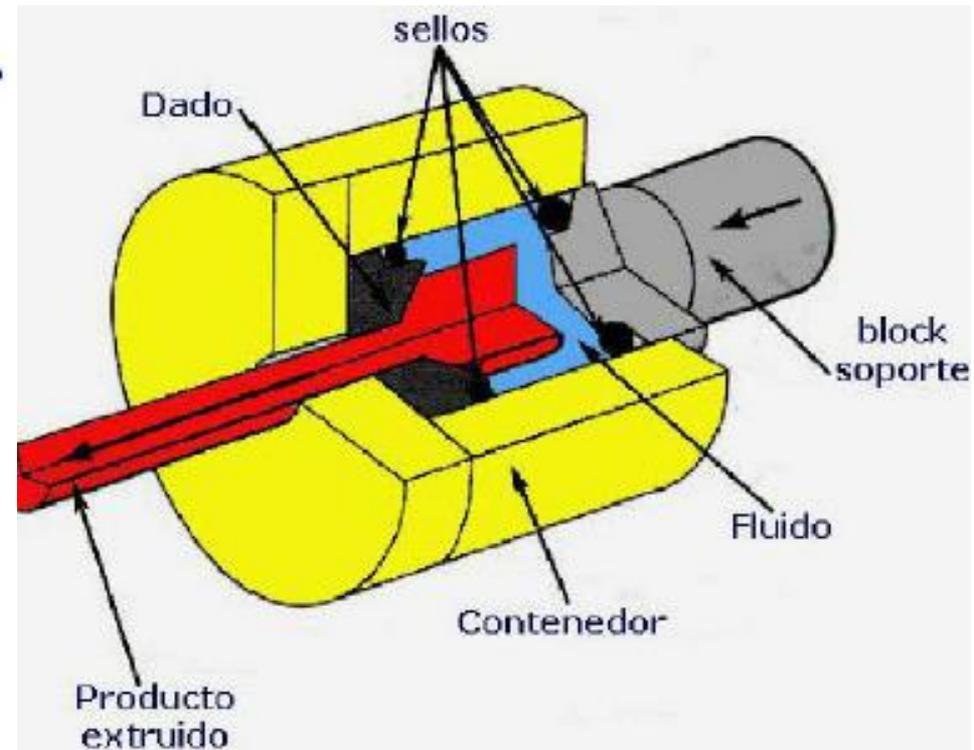
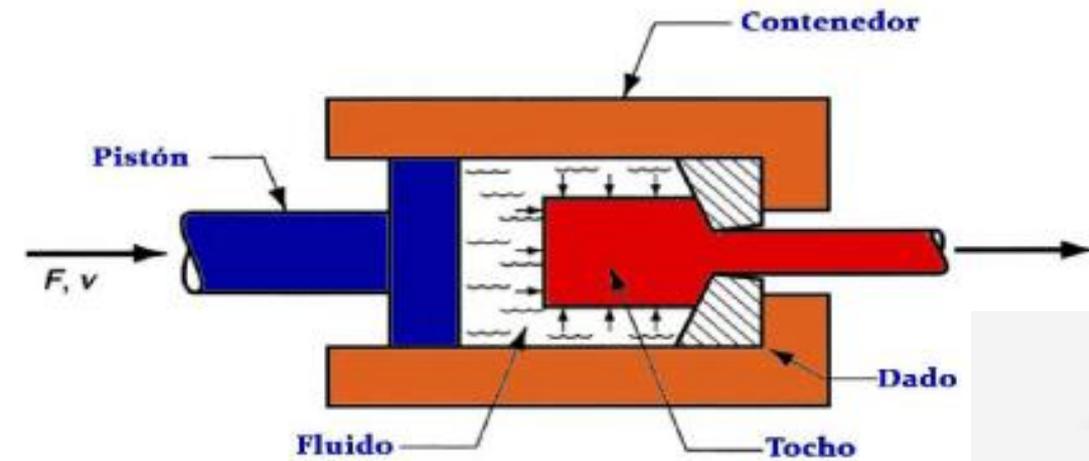
Al final de la extrusión

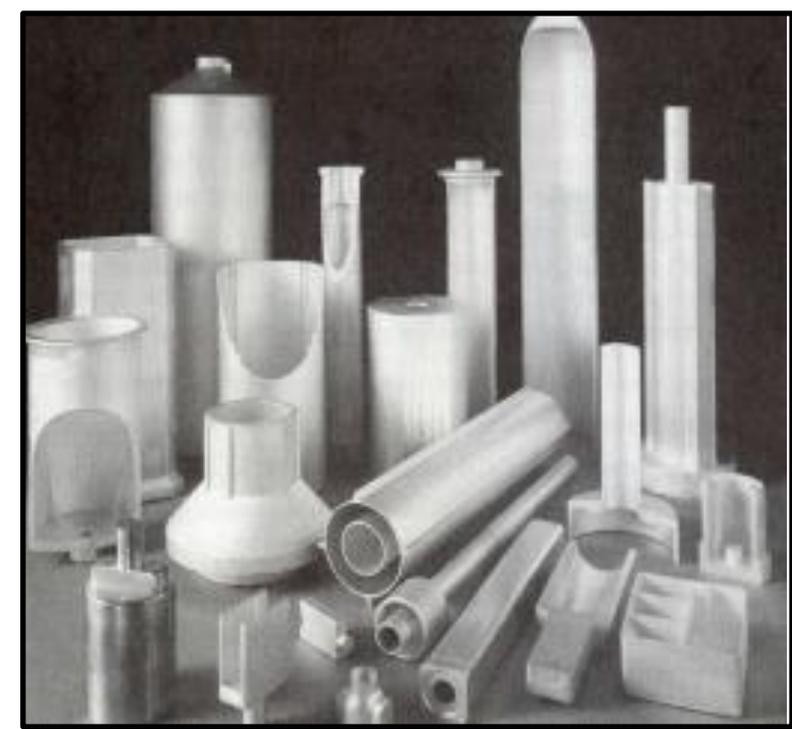
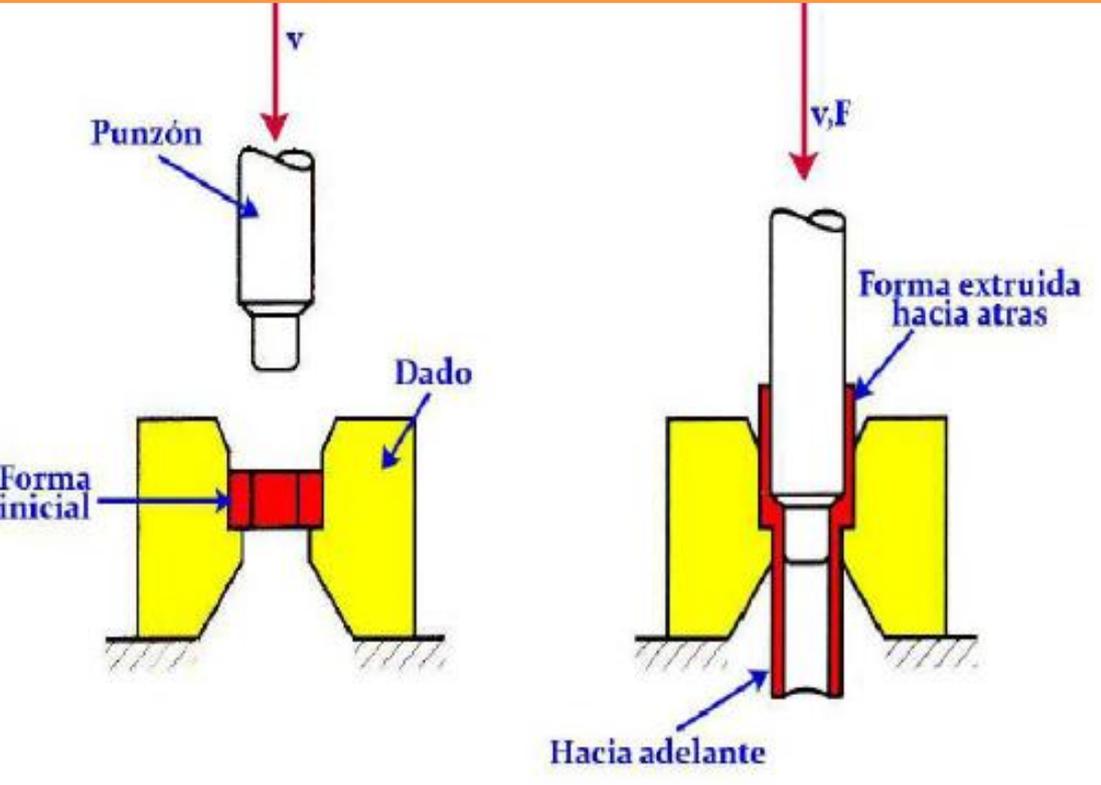
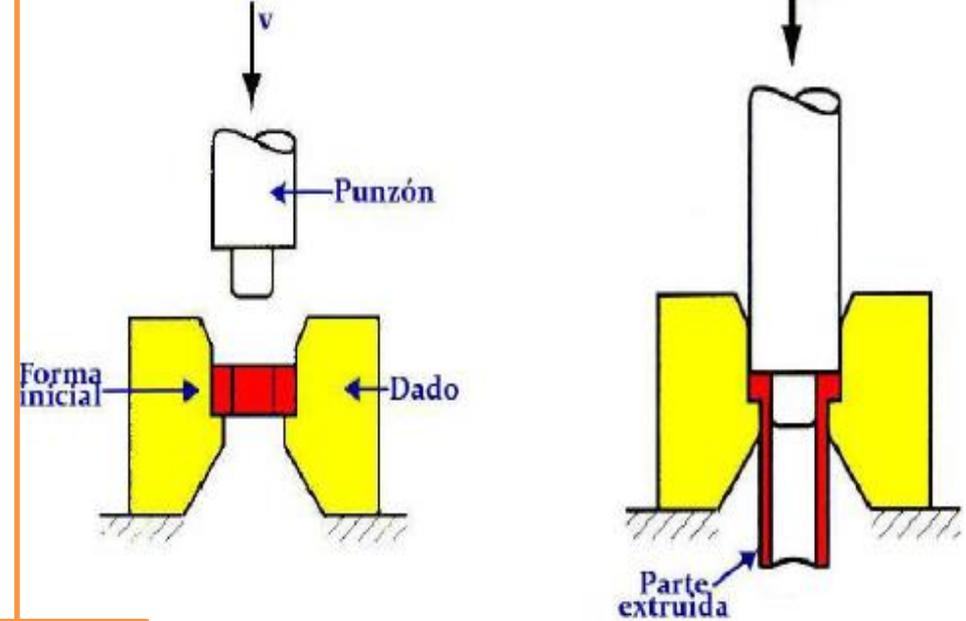
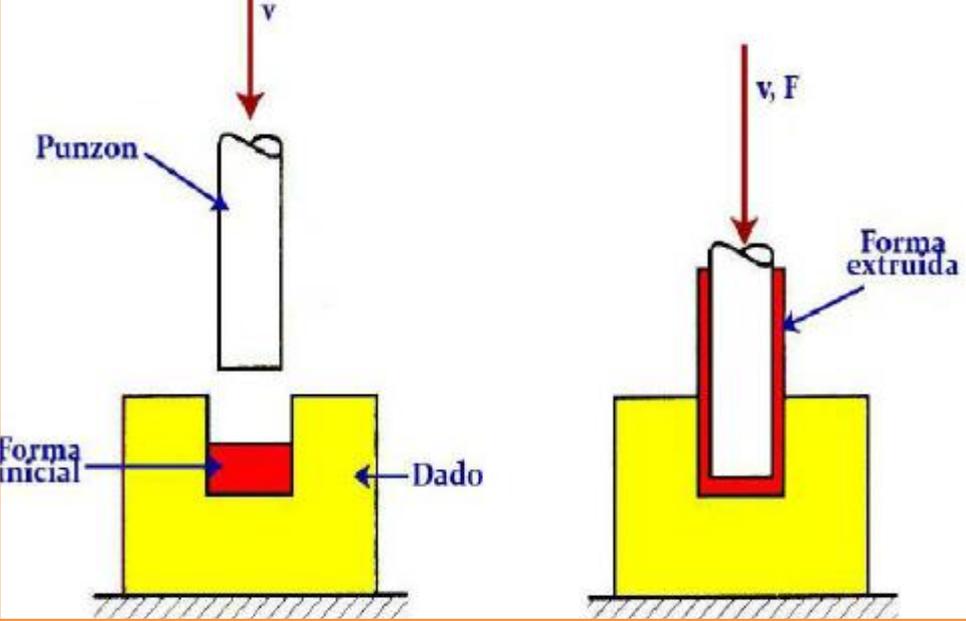
Extrusión indirecta para producir una sección transversal hueca o semihueca



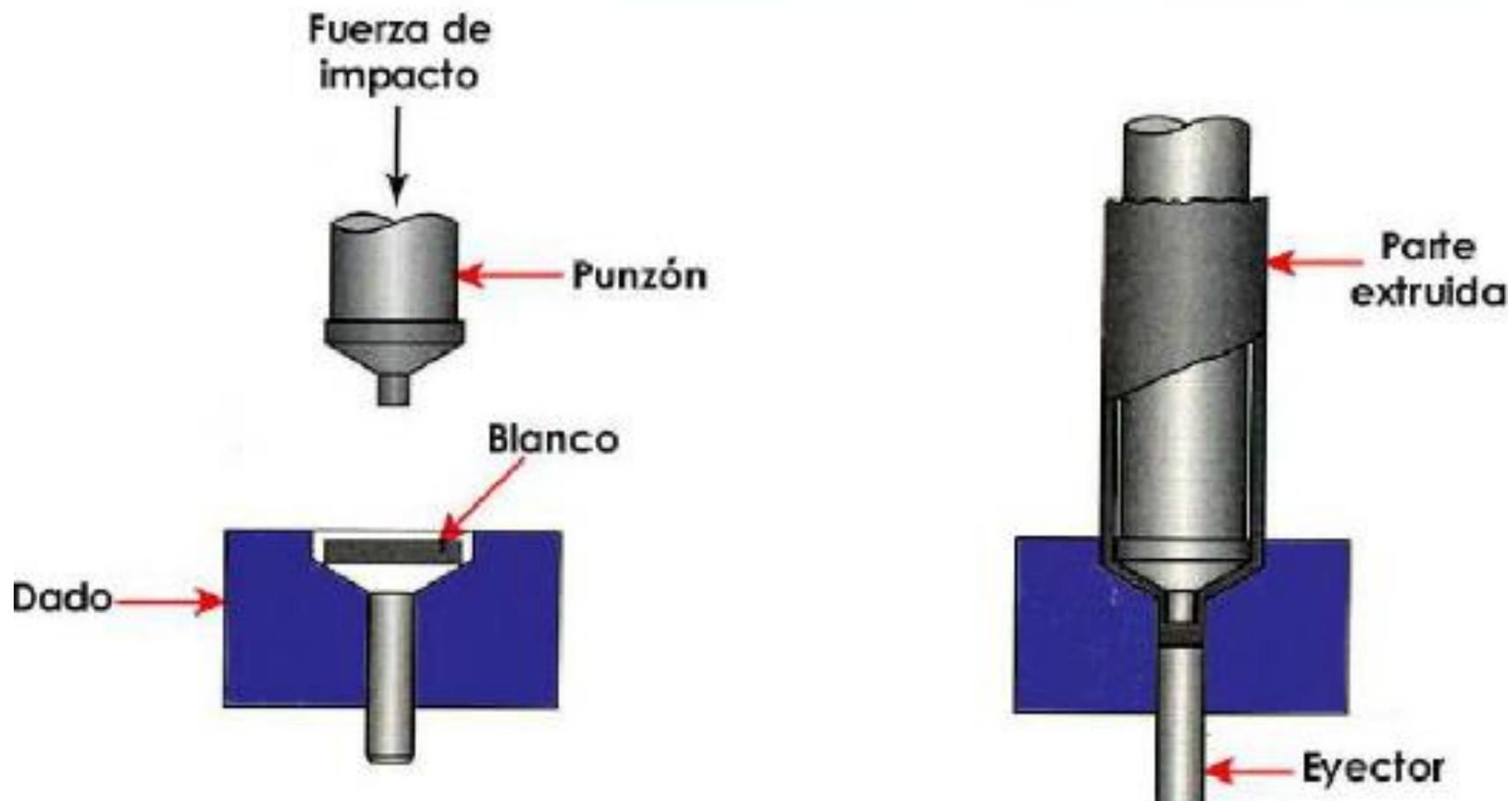


EXTRUSIÓN HIDROSTÁTICA

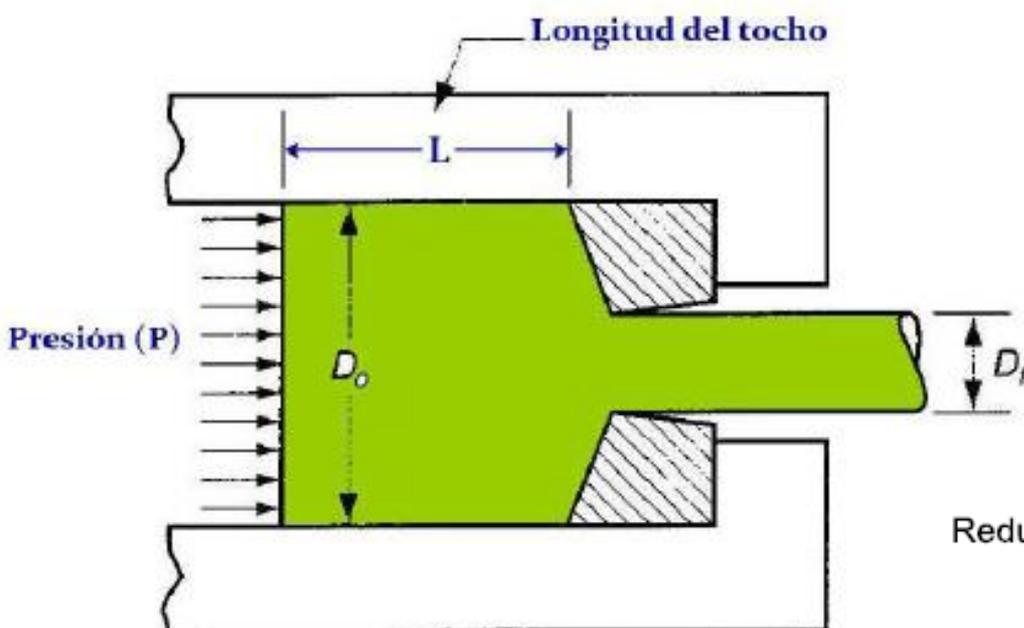




Elaboración de un tubo dental por extrusión por impacto



Análisis de la extrusión directa para secciones circulares



Reducción

$$r_x = \frac{A_0}{A_f}$$

Deformación ideal

$$\varepsilon = Ln \frac{A_0}{A_f}$$

Presión de extrusión
(No considera la fricción)

$$P = \sigma_c Ln r_x \quad \text{ó} \quad \sigma_c Ln \frac{A_0}{A_f}$$

**Considerando la fricción: Se emplea la ecuación empírica de Johnson, las constantes "a" y "b" son:
a = 0.8 y b = 1.2 a 1.5**

Deformación real en la extrusión

$$\varepsilon_x = a + b \ln r_x \quad \text{ó} \quad a + b \ln \frac{A_0}{A_f}$$

EXTRUSIÓN DIRECTA

Se toma en cuenta la fricción entre los dados y material de trabajo (ε_x) y la fricción entre el contenedor y material de trabajo ($2L/D_0$)

$$P = \sigma_c \left[\varepsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right] \quad F = \sigma_c \left[\varepsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right] A_0$$

EXTRUSIÓN INDIRECTA

Solo se considera la fricción entre los dados y material de trabajo (ϵx)

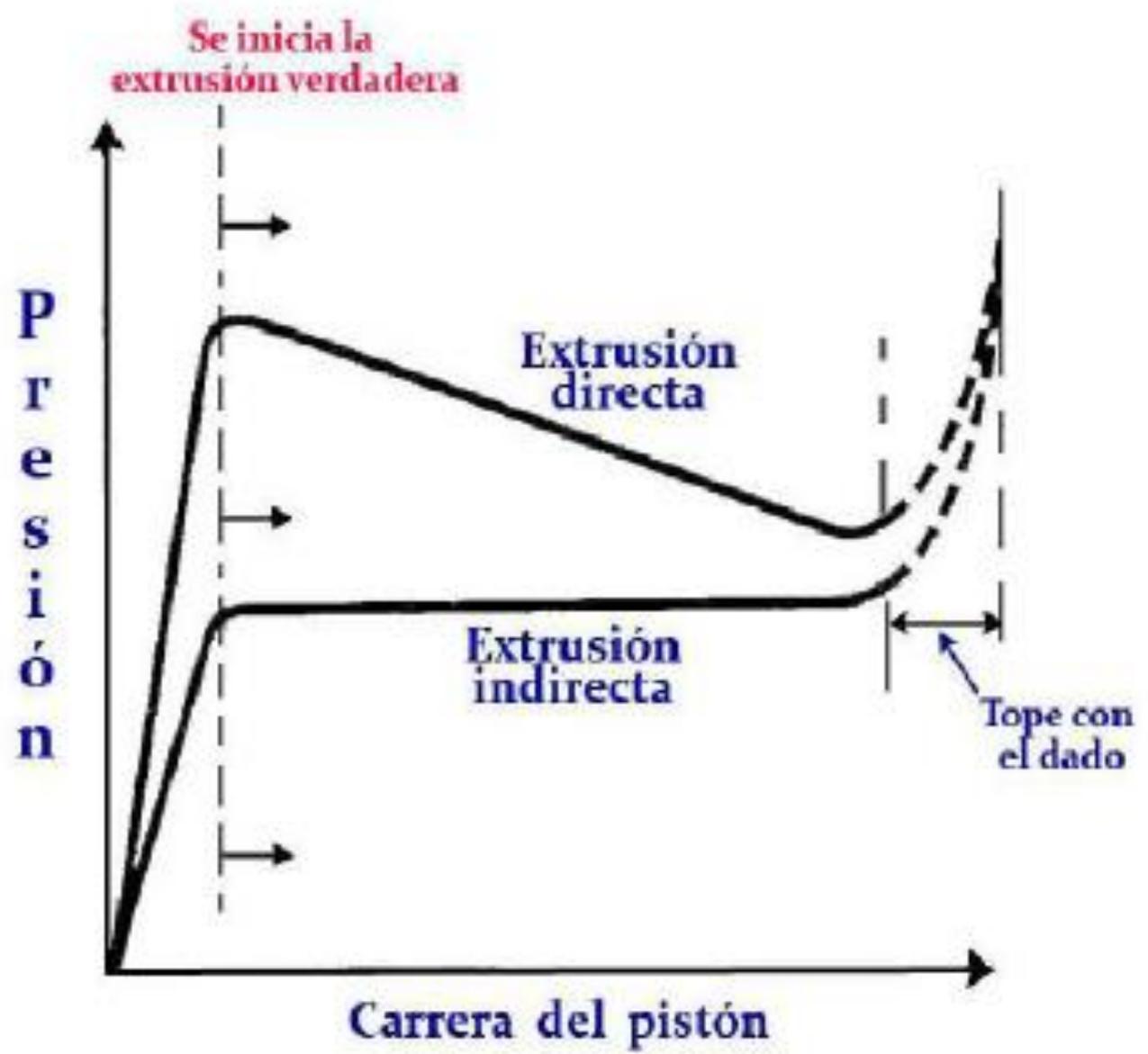
$$P = \sigma_c \epsilon_x \therefore \sigma_c (a + b \ln r_x) \quad F = \sigma_c (a + b \ln r_x) A_0$$

Las ecuaciones anteriores solo son aplicables cuando la sección transversal es maciza y circular.

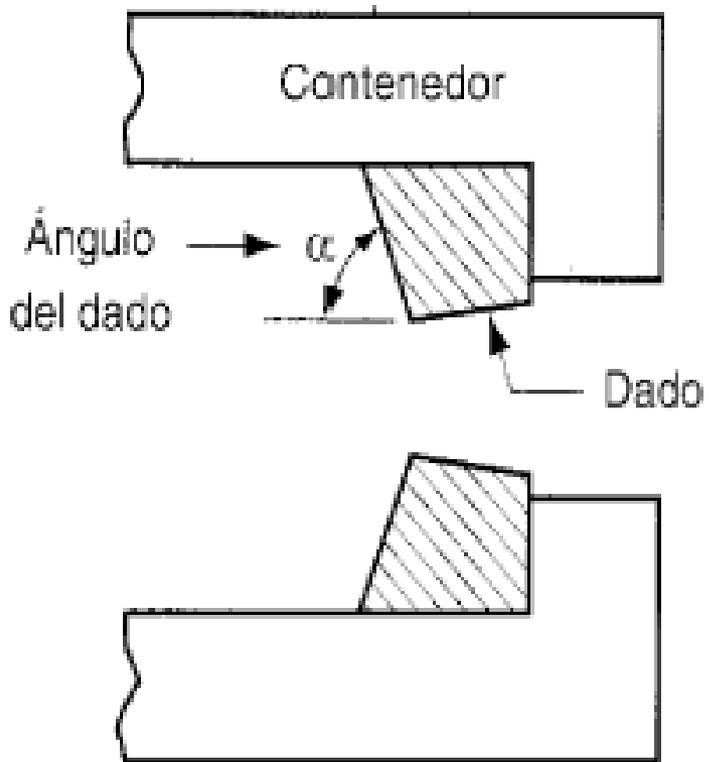
Cuando se tienen secciones huecas y no circulares de formas complejas, aplica una corrección dada por K_f (Coef. de forma). Donde C_x es el perímetro de la sección extruida y C_c es el perímetro de un círculo con área equivalente a la sección extruida

$$K_f = 0.98 + 0.02 \left[\frac{C_x}{C_c} \right]^{2.25}$$

COMPARATIVO DE LA PRESIÓN EN EXTRUSIÓN DIRECTA E INDIRECTA



ANÁLISIS DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN



ÁNGULO DEL DADO EN EXTRUSIÓN DIRECTA



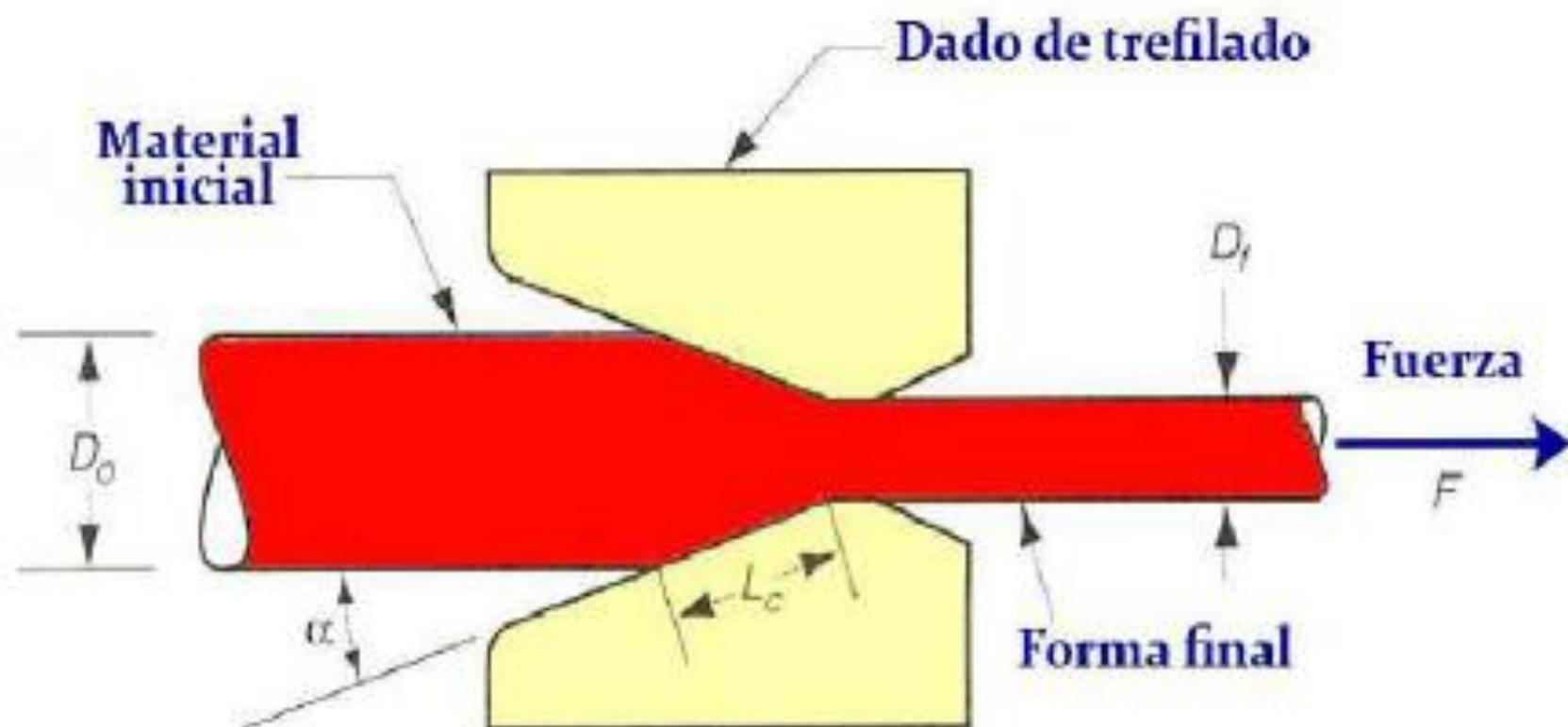
EFFECTO DEL ÁNGULO DEL DADO SOBRE LA FUERZA

PROCESO DE TREFILADO O ESTIRADO

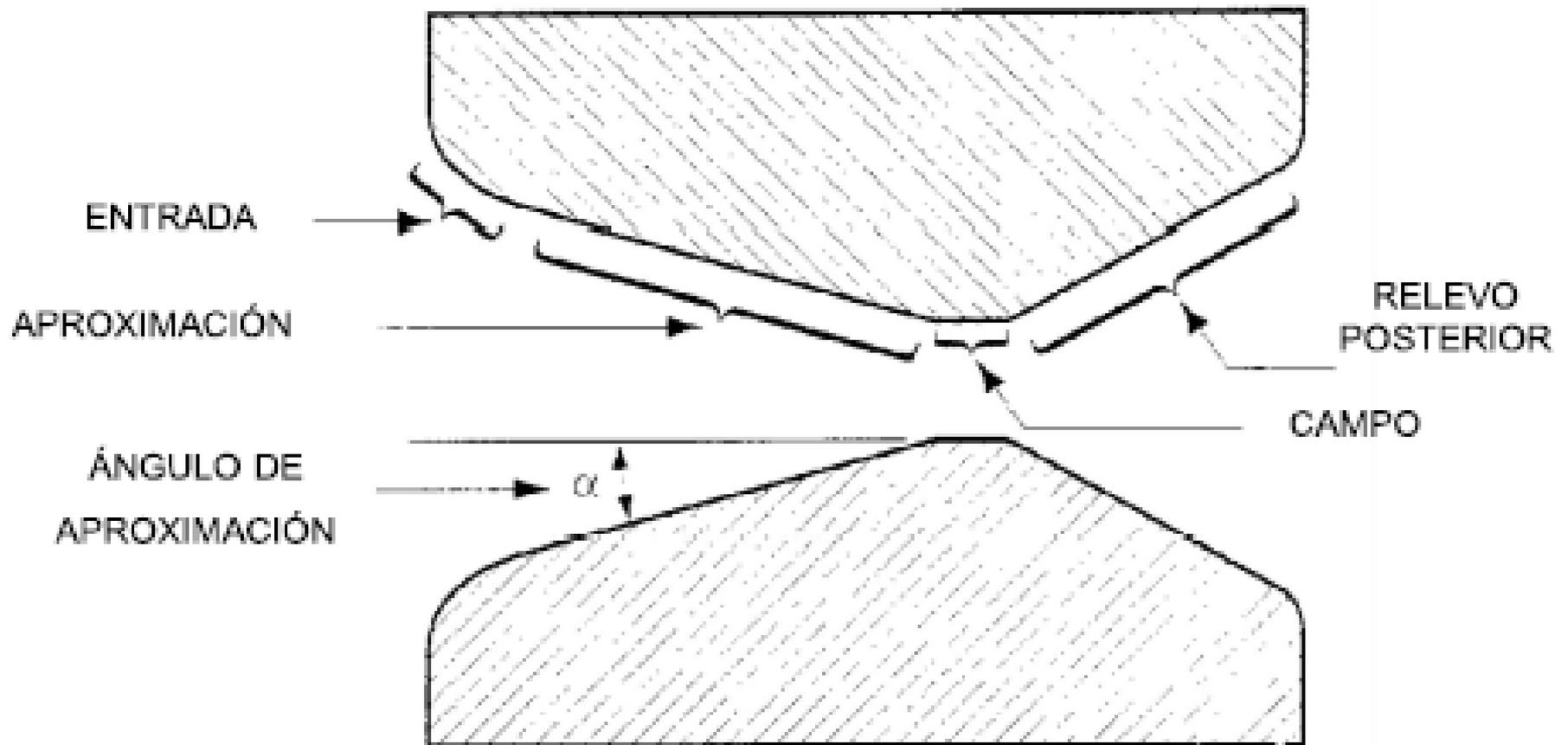


PROCESO DE TREFILADO O ESTIRADO

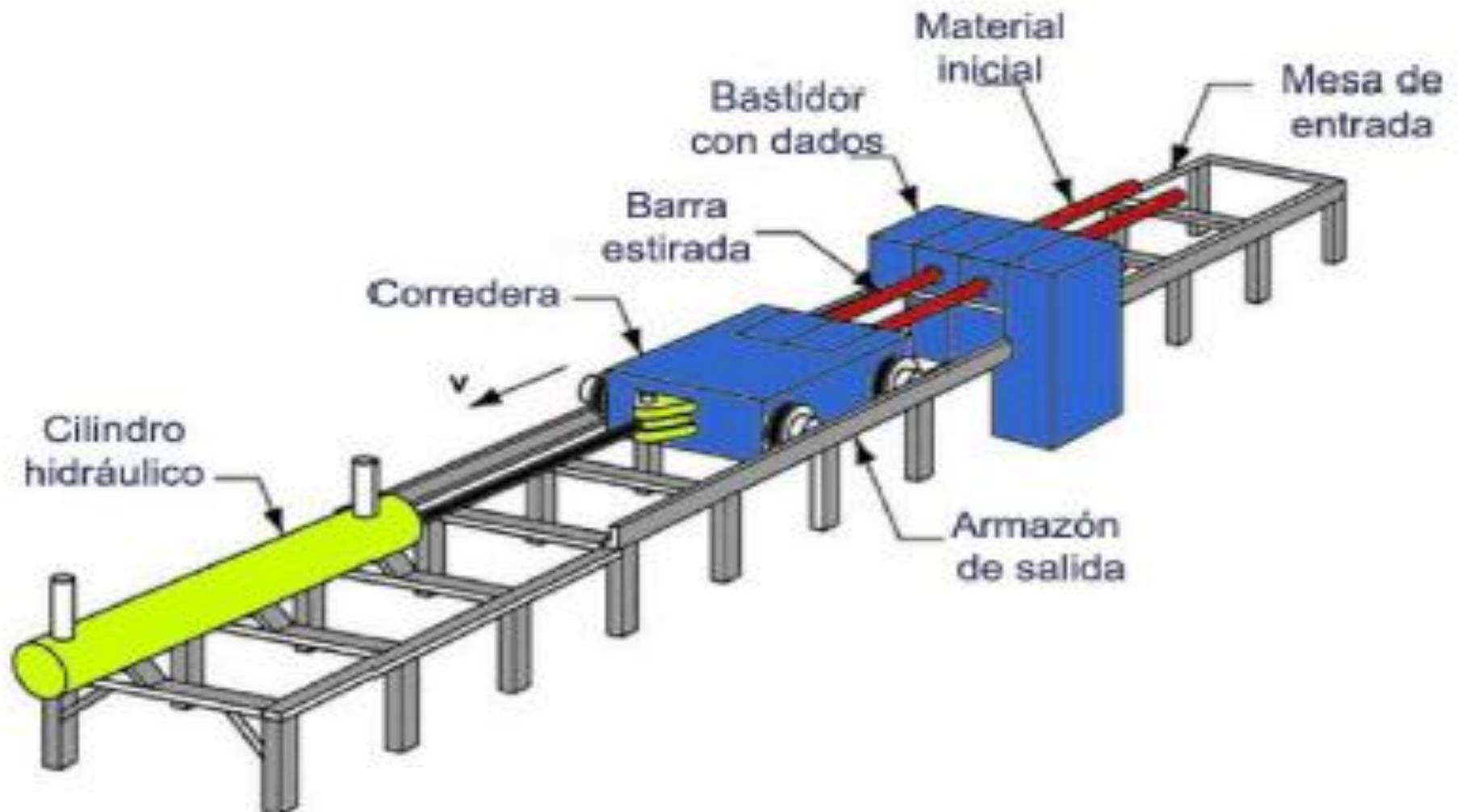
El trefilado o estirado es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce al tirar del material a través de la abertura de un dado



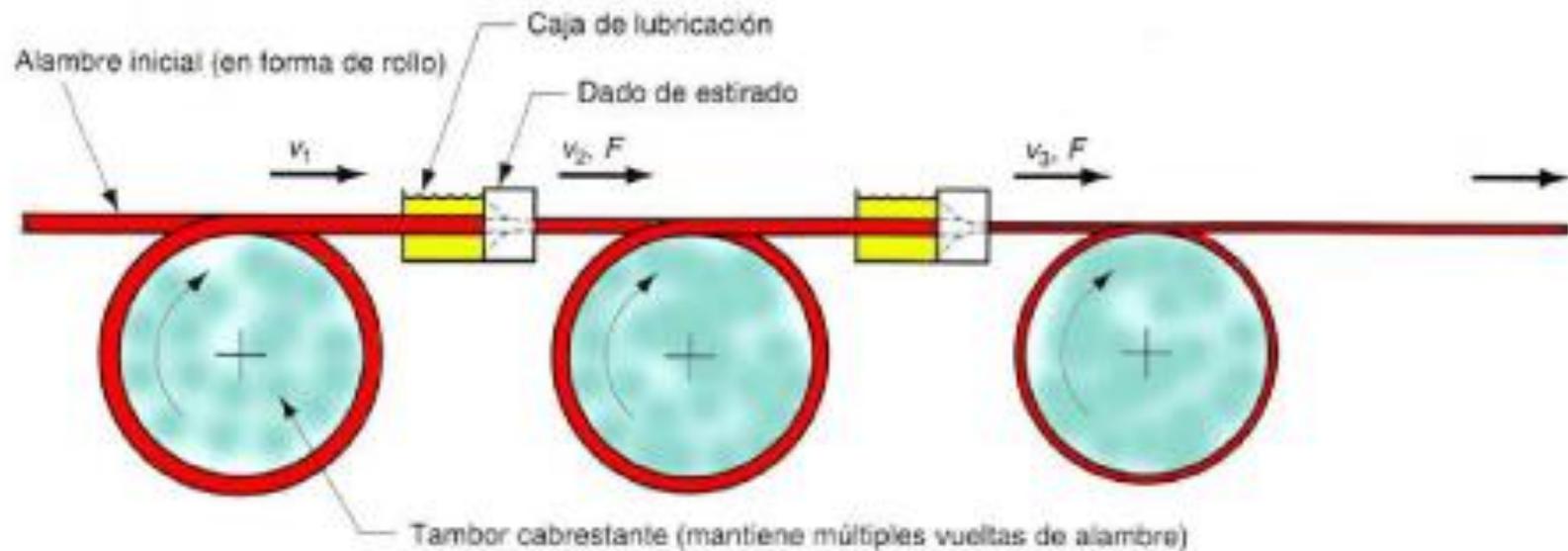
dado de trefilado



Estirado de barras

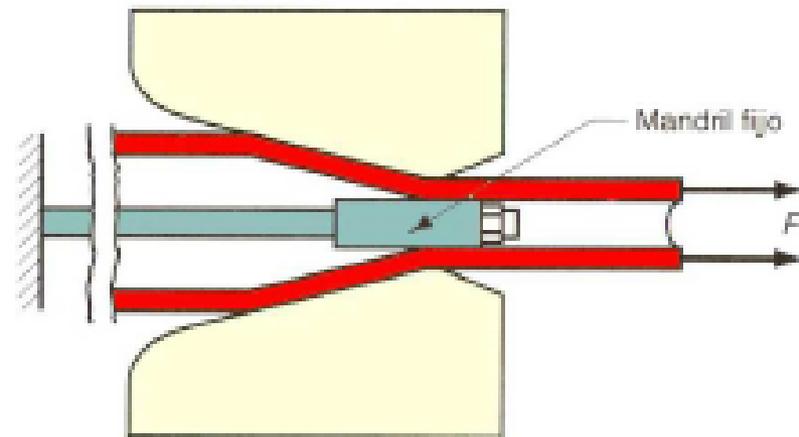


Trefilado continuo de alambre

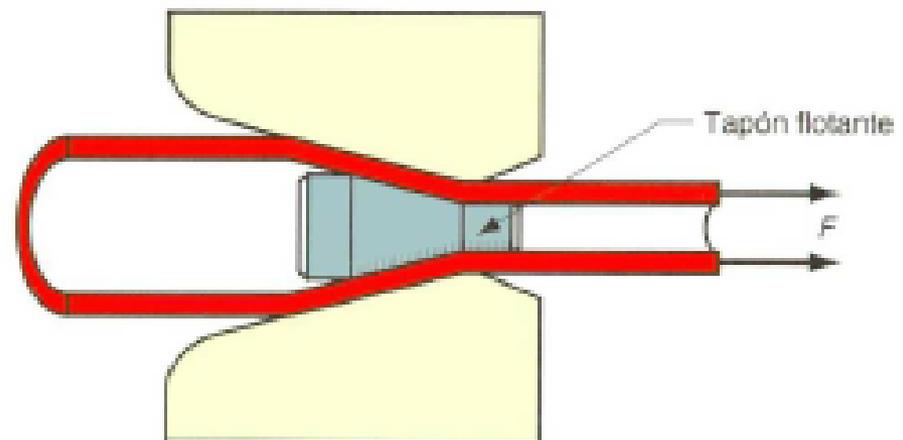


El estirado del alambre se hace con máquinas estiradoras continuas que contienen múltiples dados estiradores separados por tambores de acumulación entre los dados. Cada tambor (cabrestante o molinete), es movido por un motor que provee la fuerza apropiada para estirar

Estirado de tubos con mandriles



Mandril fijo



Tapón flotante

Análisis del trefilado o estirado sin fricción

$$\text{Reducción} = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A_f}$$

$$\sigma_d = \sigma_c \varepsilon$$

$$\sigma_d = \sigma_c \ln \frac{A_0}{A_f}$$

Análisis del trefilado o estirado con fricción

Ecuación de Schey

$$\sigma_d = \sigma_c \left[1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right] \phi \ln \frac{A_0}{A_f}$$

$$D = \frac{D_0 + D_f}{2}$$

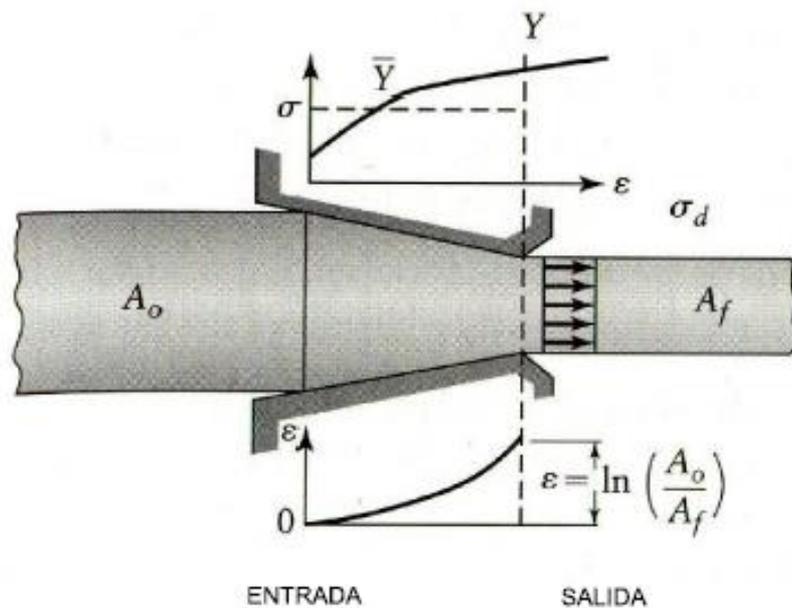
Factor de deformación
no homogénea

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c}$$

$$L_c = \frac{D_0 - D_f}{2 \operatorname{sen} \alpha}$$

PROCESO DE TREFILADO O ESTIRADO

Esfuerzos y deformaciones durante la operación de trefilado



$$\sigma_d = \sigma_c \left[1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right] \left[0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} \right] \ln \frac{A_o}{A_f}$$

$$F_d = \sigma_c \left[1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right] \left[0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} \right] \ln \frac{A_o}{A_f} (A_f)$$