



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza

GRADO: INGENIERIA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES  
Procesos de Fabricación

# *Procesos de deformación*



**Jesús Velázquez Sancho**



# Introducción

**Definición:** La deformación se puede definir como el proceso, que partiendo de una preforma, provoca un deslizamiento de sus partículas sin que estas pierdan su cohesión.

## Clasificación según el grado de deformación:

- Deformación volumétrica: Aquellos que cambian drásticamente su forma o notablemente alguna de sus dimensiones.
- Deformación parcial o de lámina metálica: Se caracteriza por ejercer presión sobre gran parte de su superficie, si bien el volumen de la zona deformada es mínimo.

## Tipos de esfuerzos básicos:

- Tracción: Hace que se separen entre sí las distintas partículas que componen una pieza, tendiendo a alargarla
- Compresión: Hace que se aproximen las diferentes partículas de un material, tendiendo a producir acortamientos o aplastamientos
- Flexión: Es una combinación de compresión y de tracción.
- Cizalladura: Se produce cuando se aplican fuerzas perpendiculares a la pieza, haciendo que las partículas del material tiendan a resbalar o desplazarse las unas sobre las otras.



# Introducción

## Temperatura de trabajo

- Trabajo en frío
- Trabajo templado
- Trabajo en caliente

## Ciclo térmico

- Calentamiento del material
- Operación de deformación
- Enfriamiento hasta temperatura ambiente
- Aumento de la temperatura para realizar el tratamiento térmico
- Enfriamiento hasta temperatura ambiente

## Características

- Economizar material y tiempo (grandes series)
- Cambios significativos en pieza con deformación en caliente
- Incrementar resistencia de pieza con deformación en frío
- Producen muy poco desperdicio
- Diseño de guías más exactas
- Ordenador para diseño matrices



# Índice de los procesos de deformación volumétrica

## 1. Laminación

- 1.1. Introducción
- 1.2. Análisis del proceso
- 1.3. Defectos
- 1.4. Otros procesos de laminación
- 1.5. Equipos y utillajes: Tipos de molinos

## 2. Forja

- 2.1. Introducción
- 2.2. Operaciones de forjado
- 2.3. Análisis del proceso
- 2.4. Defectos
- 2.5. Equipos y utillajes

## 3. Extrusión

- 3.1. Introducción
- 3.2. Clasificación
- 3.3. Análisis del proceso
- 3.4. Defectos

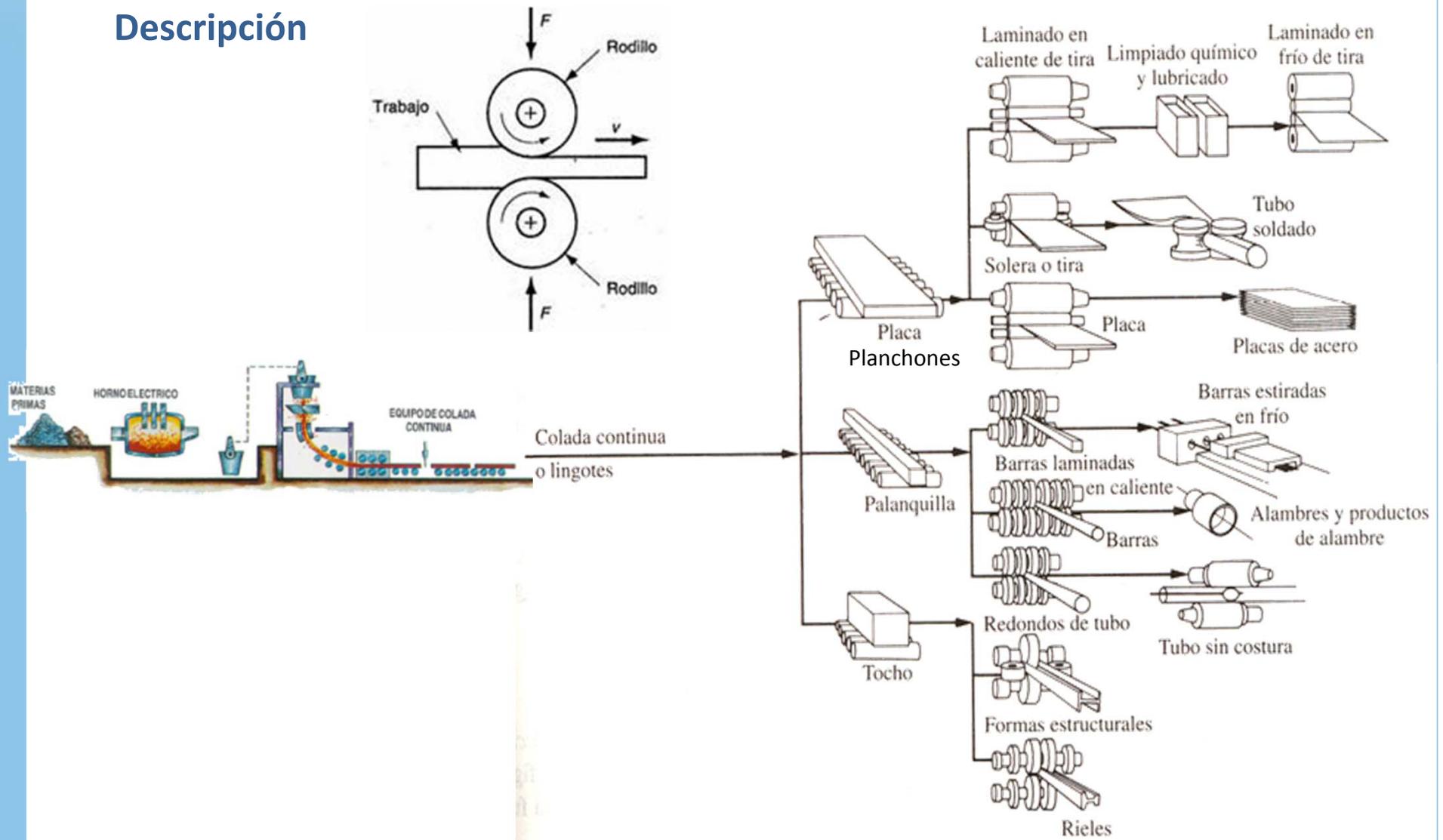
## 4. Estirado o trefilado

- 4.1. Introducción
- 4.2. Análisis del proceso
- 4.3. Defectos y esfuerzos
- 4.4. Equipos y utillajes



# 1.1. Introducción.

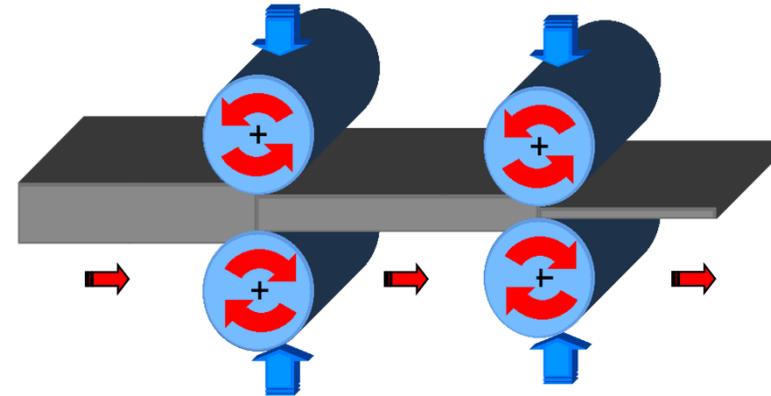
## Descripción





## 1.1. Introducción.

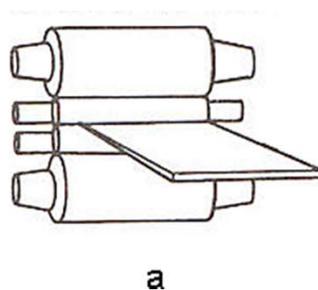
**Definición:** El laminado es el proceso de reducir el espesor de una pieza larga mediante fuerzas de compresión aplicadas a través de un juego de rodillos.



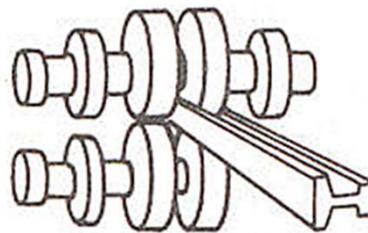
El laminado también se puede utilizar para modificar la sección transversal de una pieza larga

Tipos de laminado:

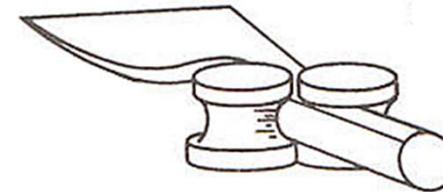
- Laminado plano (a)
- Laminado de forma (b)
- Producción de tubo y tubería (c)



a



b



c

Formas de entrada: Lingotes fundidos o colada continua

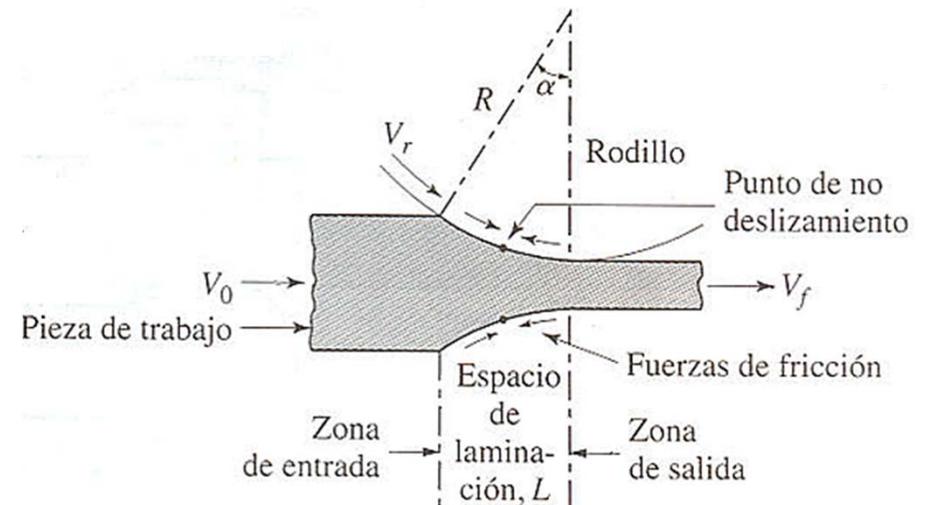
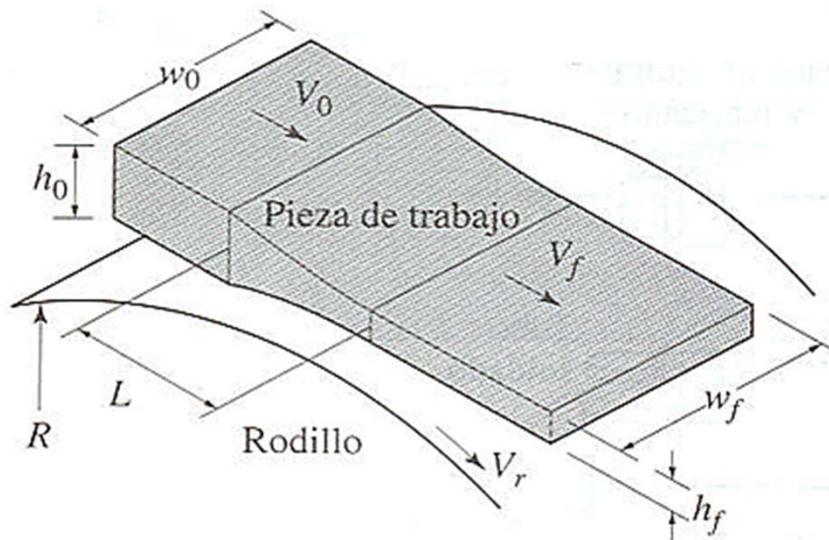


## 1.2. Análisis del proceso

### Laminado plano

Se produce una reducción de espesor ( $h_0 \rightarrow h_f$ ) en la longitud de laminación ( $L$ ) que se denomina tiro

Velocidad superficial de los rodillos es  $V_r$   
Velocidad de la pieza de trabajo  $V_0 \rightarrow V_f$  }  $\Rightarrow$  Existe deslizamiento relativo  
Punto neutro  $V_{\text{placa}} = V_r$





## 1.2. Análisis del proceso

### Laminado plano

Las fuerzas de fricción se oponen al movimiento

Máxima reducción posible o tiro máximo posible:  $h_o - h_f = \mu^2 \cdot R$

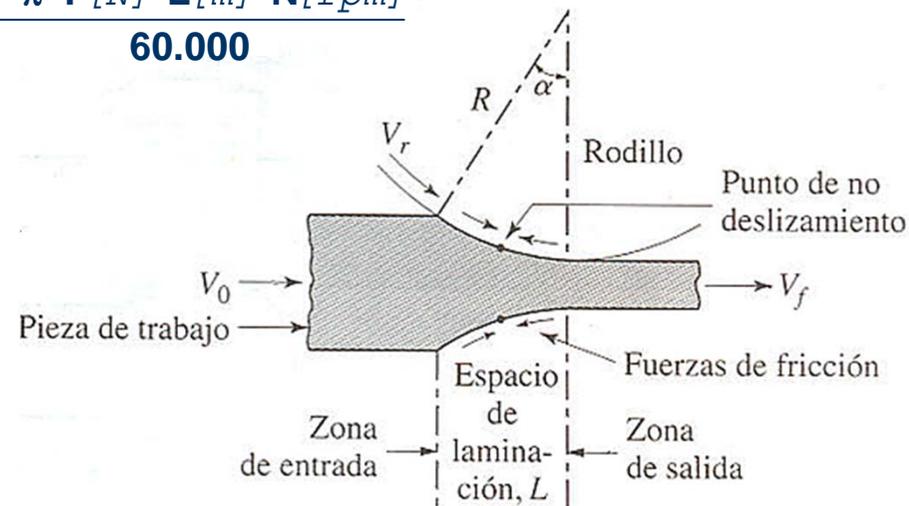
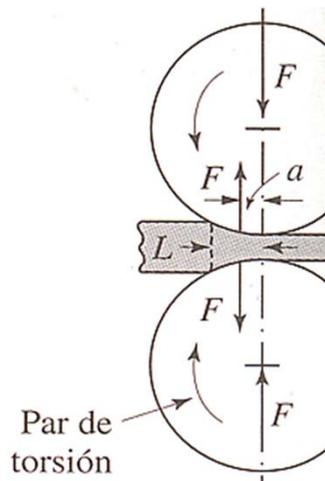
Fuerza del rodillo:

$$F [N] = L [m] \cdot w_f [m] \cdot Y_{avg} [Pa]$$

donde  $Y_{avg}$  es esfuerzo promedio real (tablas)

(No se considera fricción. Si  $\mu \uparrow \Rightarrow F \uparrow$ )

Potencia : 
$$P [kW] = \frac{2 \cdot \pi \cdot F [N] \cdot L [m] \cdot N [rpm]}{60.000}$$



$$L = \sqrt{R \cdot (h_o - h_f)}$$



## 1.2. Análisis del proceso

### Laminado plano

$Y_{avg}$  (esfuerzo promedio real) depende de:

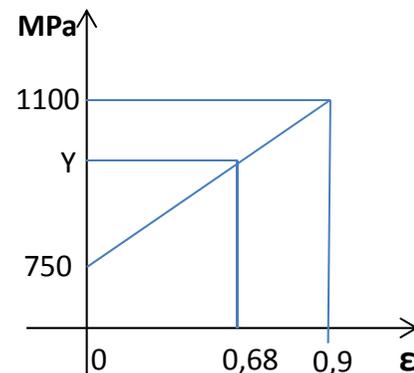
- Del material
- La deformación necesaria (deformación real)  $\epsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right)$

Diferentes maneras de calcular es  $Y_{promedio}$

a)  $Y_{avg} = (K \epsilon^n) / (n+1)$  donde n: exponente de endurecimiento por deformación  
 $\epsilon$ : deformación real  
K: coeficiente de resistencia

b)  $Y_{avg}$  por medio de tablas (ver diapositiva siguiente)  $\rightarrow$  se calcula la deformación real y luego en tablas por medio de este dato y seleccionando la gráfica del material trabajo obtenemos el esfuerzo real. Y luego hacemos la media del esfuerzo real y esfuerzo cuando  $\epsilon = 0$

c)  $Y_{avg}$  nos dan valores de una curva plástica lineal donde me indica el límite elástico y el esfuerzo para una determinada deformación. Calculamos la deformación real e interpolamos entre los datos proporcionados y una vez calculado hacemos la media entre los obtenidos en la interpolación y el límite elástico.



$$Y_{avg} = (750 + Y)/2$$



## 1.2. Análisis del proceso

### Laminado plano

$Y_{avg}$  depende de:

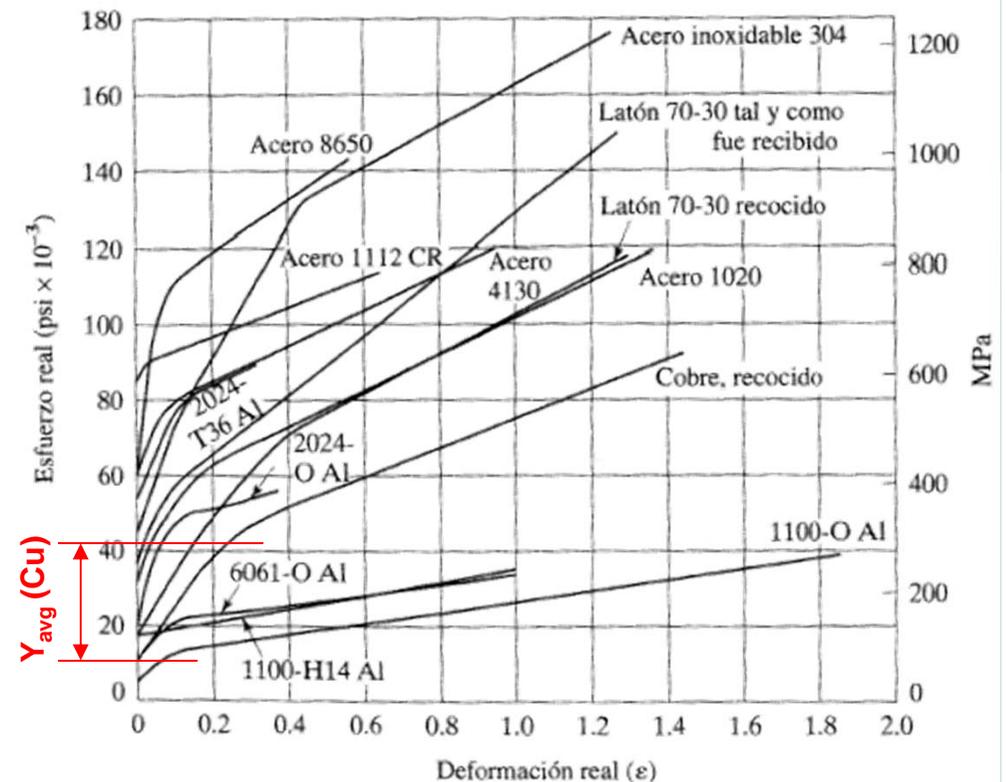
– Del material

– La deformación necesaria (deformación real)  $\epsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right)$

### Problema 1:

Una tira de cobre recocido de 228 mm de ancho y de 25 mm de espesor, se lamina a un espesor de 20 mm en una pasada. El radio del rodillo es de 300 mm, y los rodillos giran a 100 rpm. Calcular la fuerza del rodillo y la potencia requerida.

**Respuesta:**  $F=1.9$  MN,  $Pot= 770$  kW

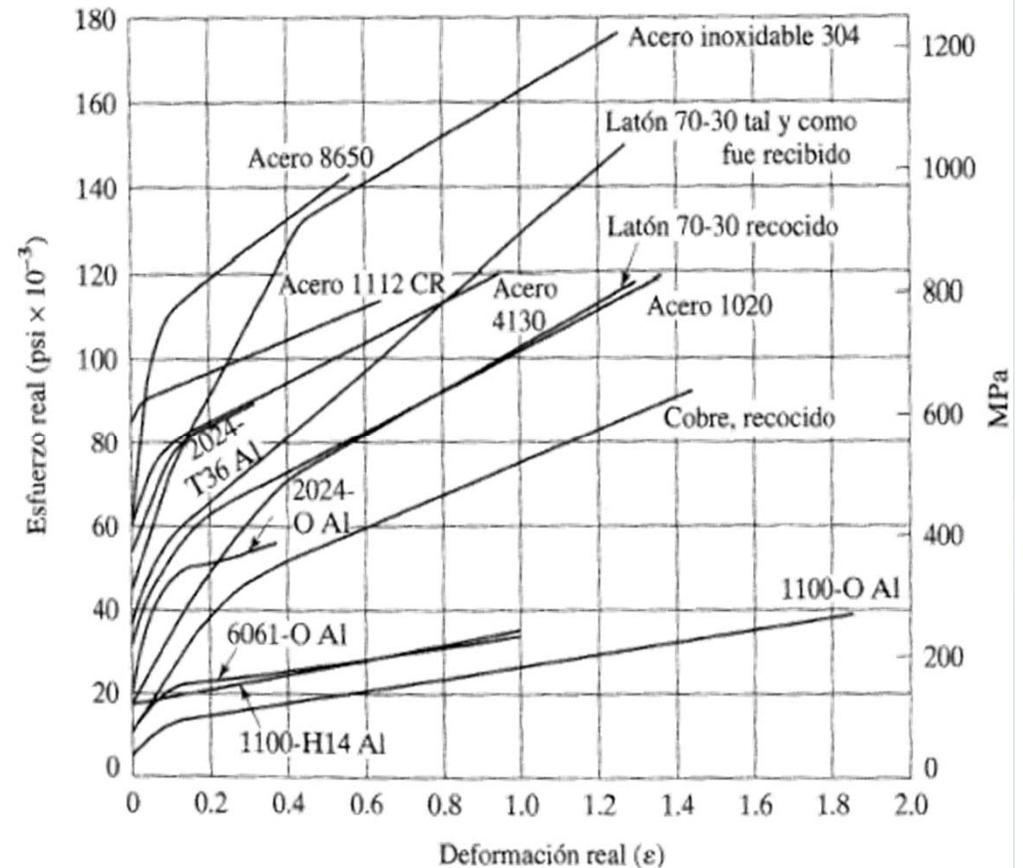




## Problema 2:

Una tira con un ancho de 300 mm y 25 mm de espesor se alimenta a través de un molino laminador de dos rodillos reversibles de 250 mm de radio cada uno. El espesor de material de trabajo se reduce a X mm, a una velocidad de 50 rpm. El material de trabajo es 6061-O Al, tiene una deformación real de 0,8 y se asume que el coeficiente de fricción entre los rodillos y el material de trabajo es de 0,12.

¿Calcular la fuerza de laminado y la potencia de trabajo?

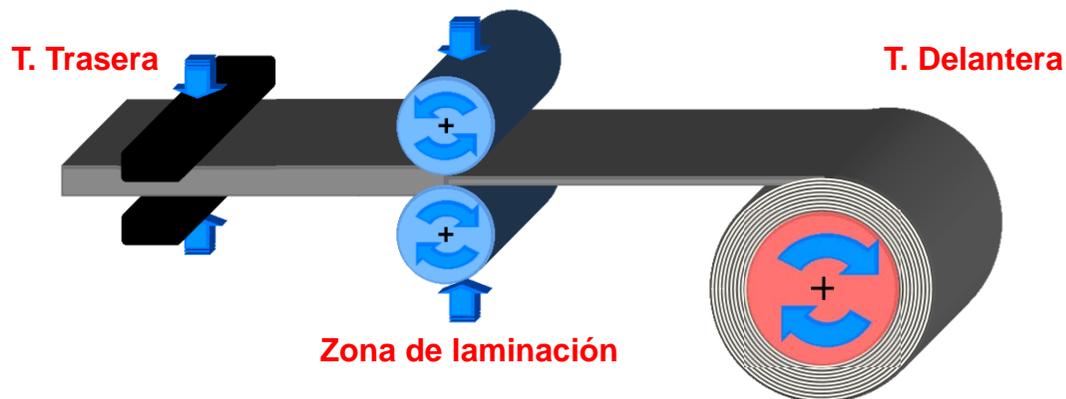




## 1.2. Análisis del proceso

### Reducción de la fuerza de laminación:

1. Reducción de la fricción mediante lubricación
2. Utilizando rodillos de diámetro menor
3. Reducciones más pequeñas por pasada
4. Laminando a Tª elevada
5. Tensiones longitudinales (reducen esfuerzo a compresión):
  - Tensión trasera
  - Tensión delantera
  - Laminación Steckel (Sólo anterior y rodillos locos)

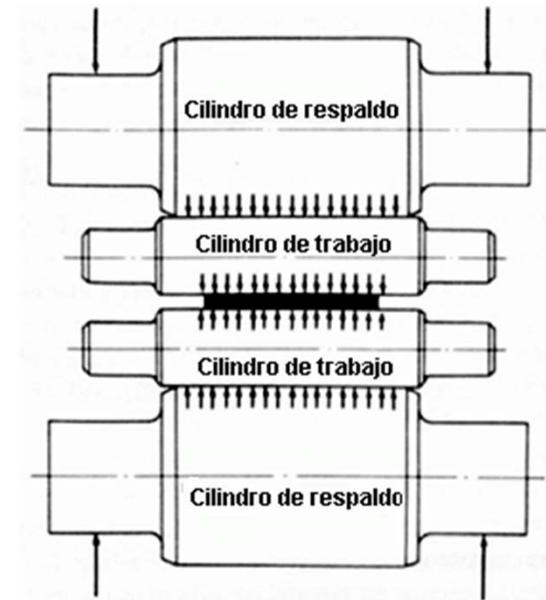


$$F [N] = L [m] \cdot w_f [m] \cdot Y_{avg} [Pa]$$

$$\text{Si } \mu \uparrow \Rightarrow F \uparrow$$

$$L = \sqrt{R \cdot (h_0 - h_f)}$$

$$\varepsilon = \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right)$$





## 1.2. Análisis del proceso

### Fuerzas de laminación

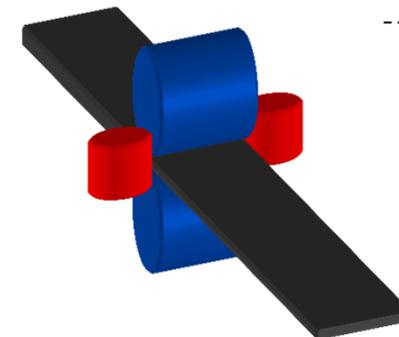
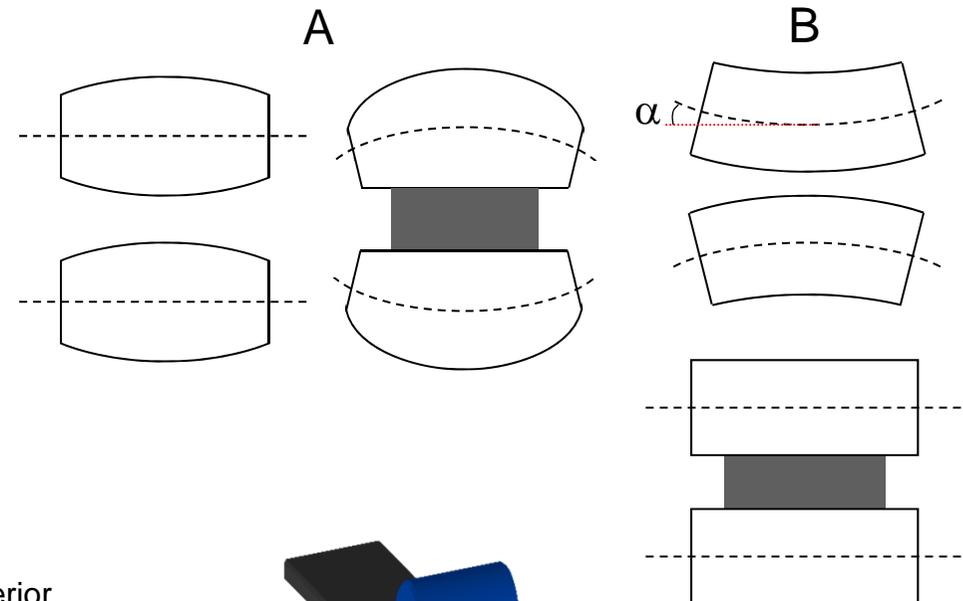
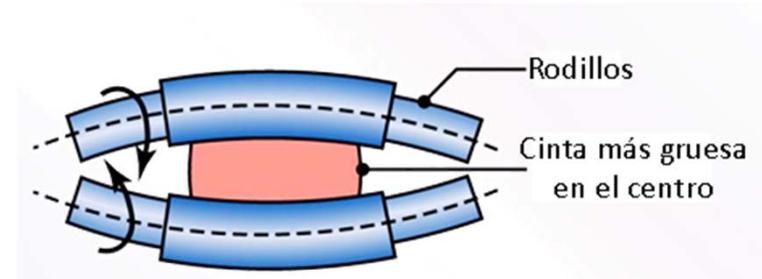
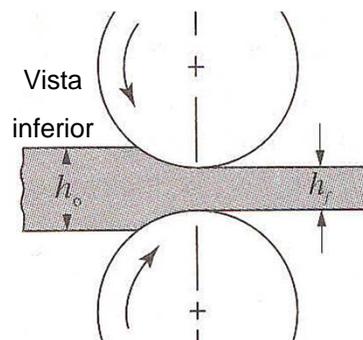
- Deflexión y aplastamiento de los rodillos
- Desviaciones geométricas en la pieza

- Soluciones:

A.- Rectificar los rodillos

B.- Aplicar flexión previa a los rodillos

- Ensanchado

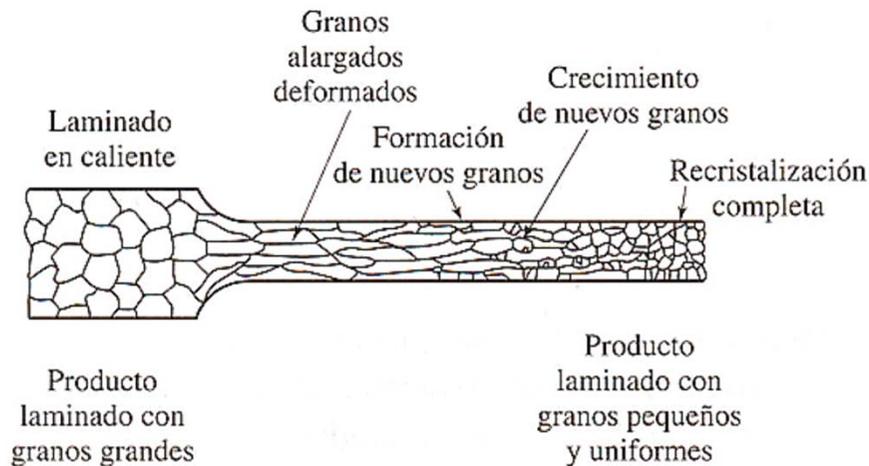




## 1.2. Análisis del proceso

### Laminación en caliente

- Por encima de  $T^a$  de recristalización
- Reorientación de grano: fibrado en la dirección de laminación, anisotropía direccional.
- Necesita **menor fuerza** de laminado
- Permite **mayores deformaciones**
- Mayor **desgaste** de rodillos
- **Menores tensiones** residuales



### Laminación en frío

- Por debajo de  $T^a$  de recristalización
- Necesita mayor fuerza de laminado
- Problemas con grandes reducciones de espesor
- **Mejores tolerancias** dimensionales:
  - Espesor en frío=  $\pm 0.1-0.35$  mm
  - Espesor en caliente= mayores
  - Planicidad en frío=  $\pm 15$  mm/m
  - Planicidad en caliente=  $\pm 55$  mm/m
- **Mejor acabado** superficial (rugosidad)
- **Mejores propiedades mecánicas** por el endurecimiento superficial



## 1.2. Análisis del proceso

### Laminación en **conjunto**

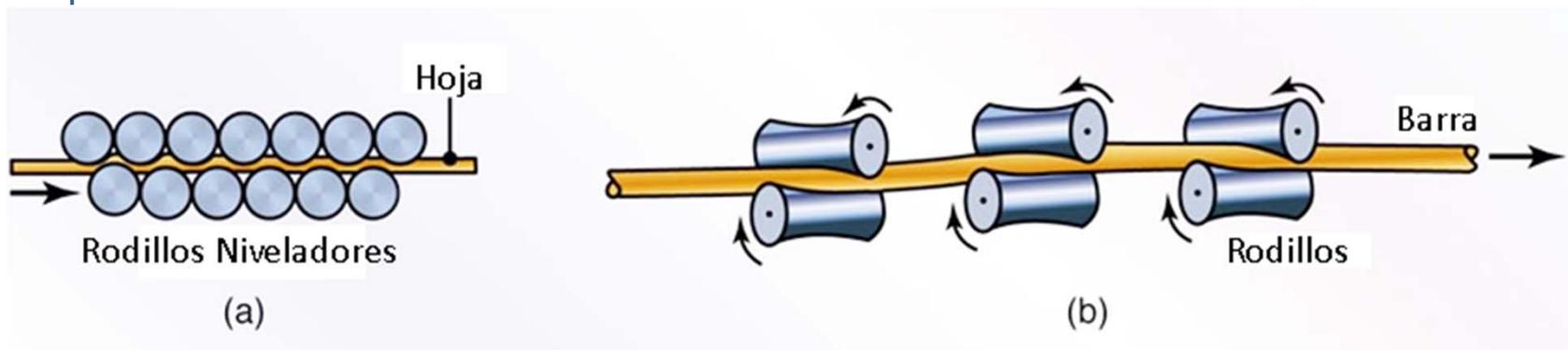
- Se laminan dos o mas capas de metal simultáneamente
- Papel de aluminio, cara brillante por contacto con los rodillos

### Laminado de **relevado** o pase superficial

- Para eliminar irregularidades superficiales conocidas como deformaciones de estirado o bandas de Lüder
- Consiste en realizar una pasada final del 1% de espesor

### Rodillos **niveladores**

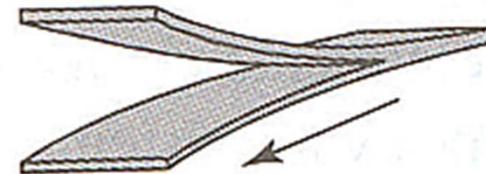
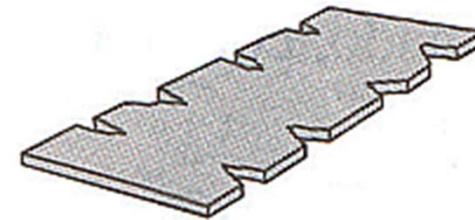
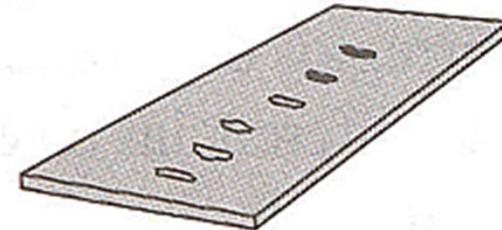
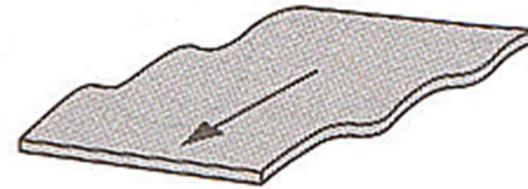
- Para eliminar la falta de planicidad producida por variaciones en el material o el proceso





## 1.3. Defectos

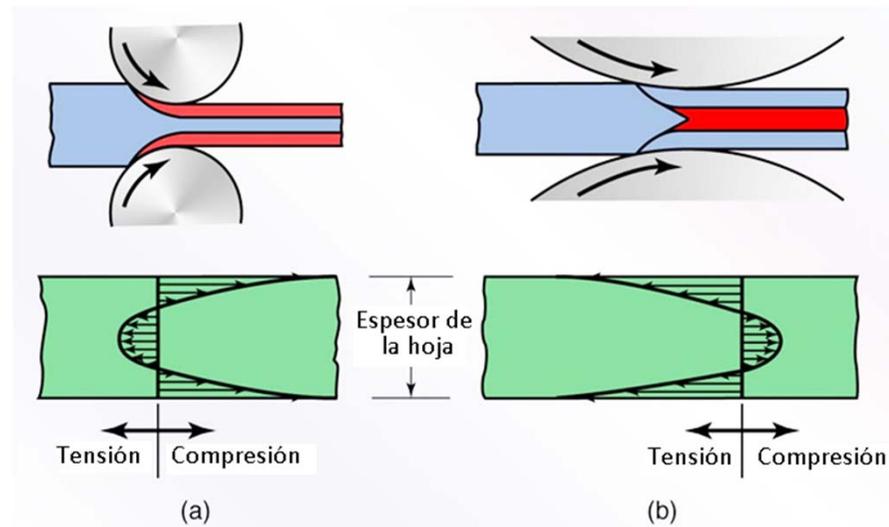
1. Bordes ondulados  
(flexión del rodillo)
2. Grietas en forma de cierre  
en el centro de la tira  
(ductilidad a Tª de laminado)
3. Grietas en los bordes  
(ductilidad a Tª de laminado)
4. Hojeamiento  
(deformación volumétrica no  
uniforme o defectos en preforma)



## 1.3. Defectos

Deformación no uniforme → Esfuerzos residuales

- Rodillo de **radio pequeño** o **pequeñas reducciones** de espesor:  
Tensiones residuales de **compresión en la superficie**  
Pueden ser beneficiosas para limitar fatigas y grietas
- Rodillo de **radio grande** o **grandes reducciones** de espesor:  
Distribución de tensiones residuales opuesta



- Con laminación en caliente se reducen las tensiones residuales

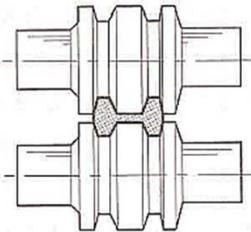


Railes para ferrocarril

# 1.4. Otros procesos de laminación

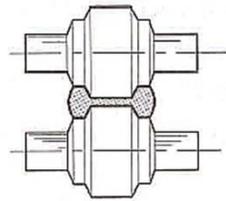
## Laminado de forma → Diseño de pases de rodillo

Etapa 1



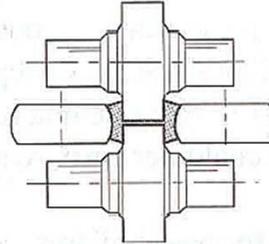
Rodillos de desbaste

Etapa 2



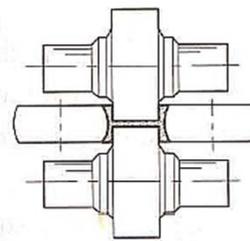
Rodillos canteadores

Etapa 3



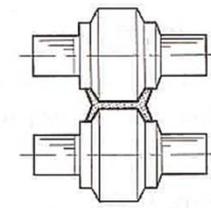
Rodillos de forma horizontal y vertical

Etapa 4



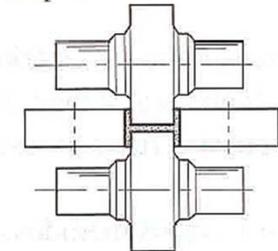
Rodillos intermedios horizontal y vertical

Etapa 5



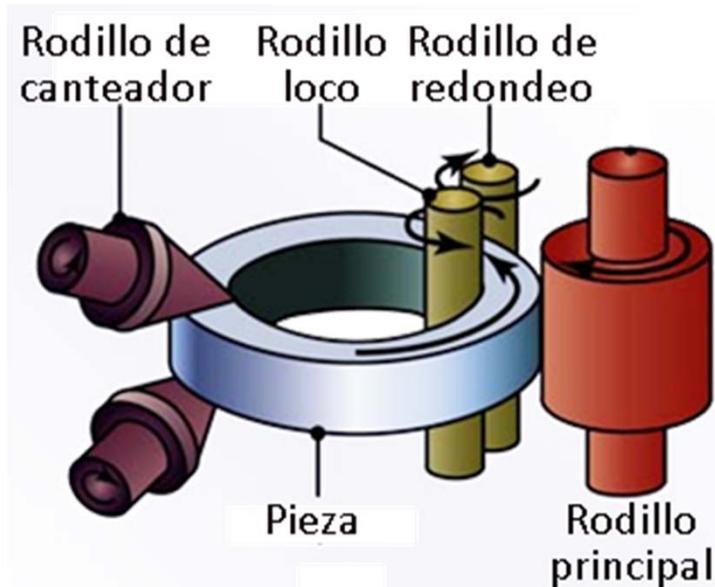
Rodillos canteadores

Etapa 6

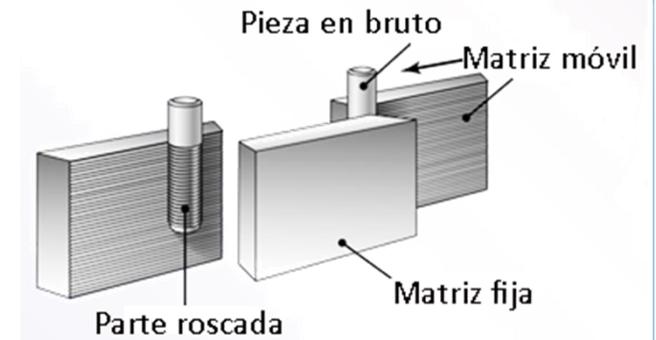


Rodillos de acabado horizontal y vertical

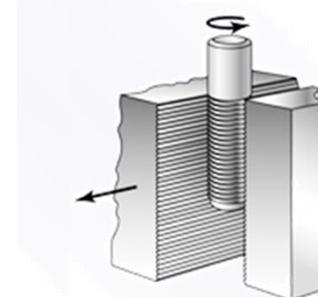
## Laminación en anillo



## Laminado de roscas



Laminado de roscas



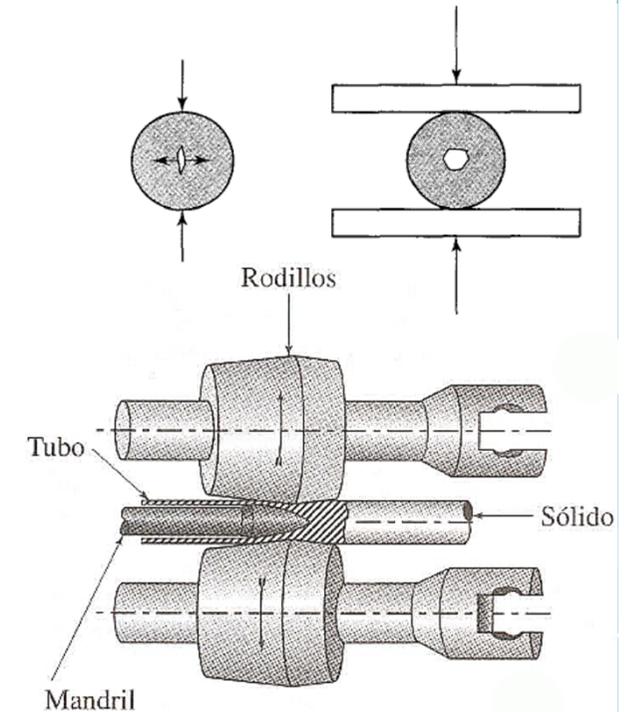
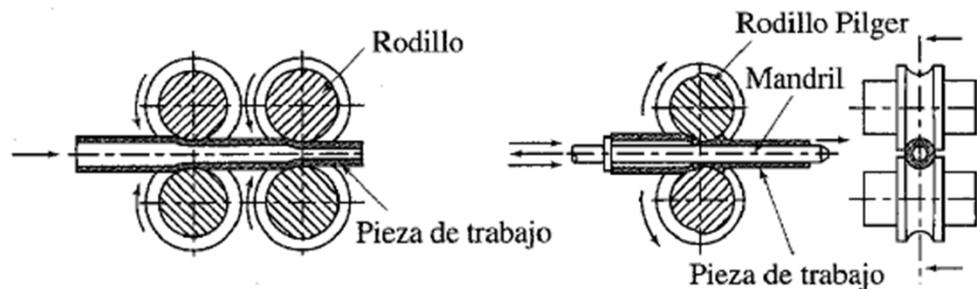
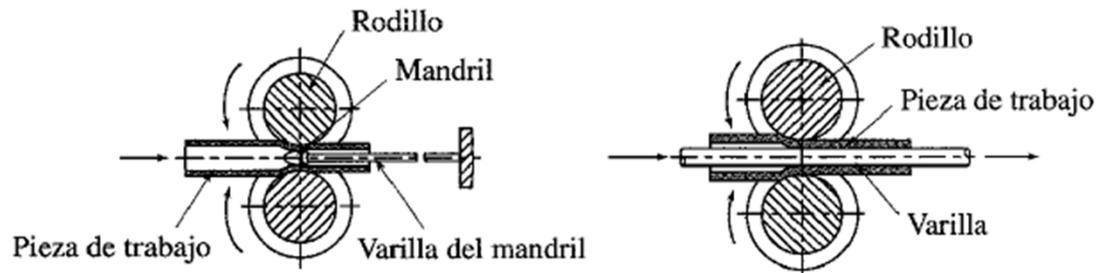


## 1.4. Otros procesos de laminación

### Preformado rotativo de tubos

- Esfuerzos cíclicos de compresión
- Proceso de laminado en caliente
- Proceso Mannesmann si se usa mandril

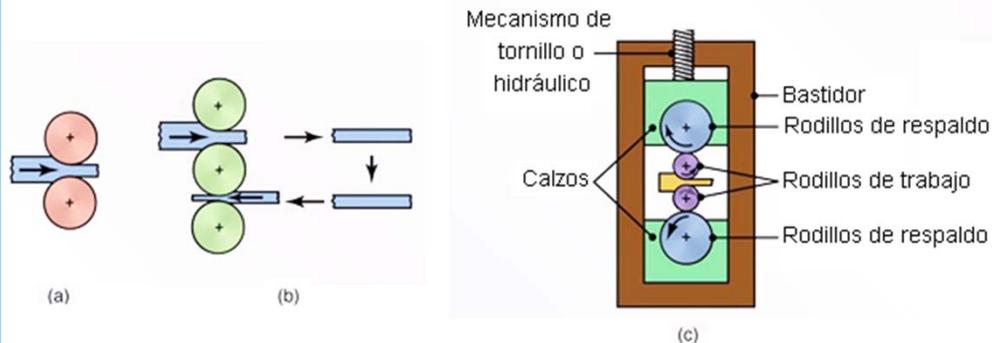
### Reducción de diámetro → Laminación de tubo



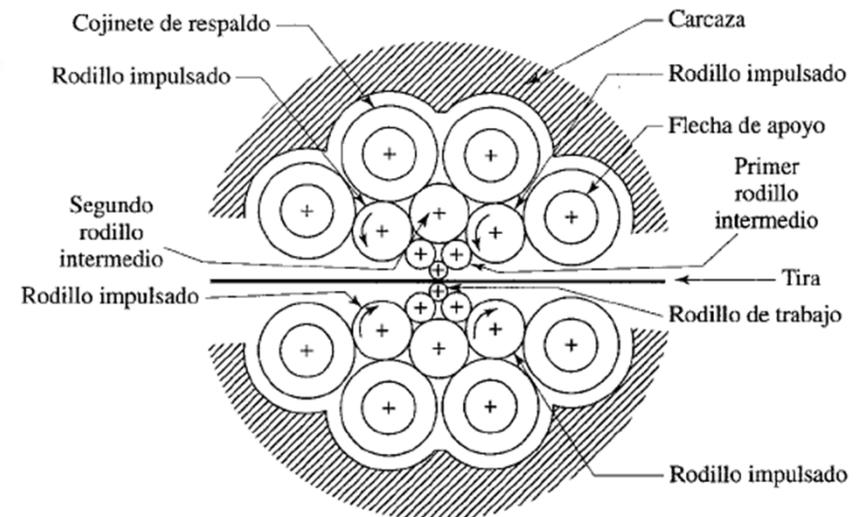


## 1.5. Equipos y utillajes: Tipos de molinos

Molinos de 2, 3 y 4 rodillos



Tren laminador de conjunto o en racimo  
([Sendzimir](#) o Z)



- Propiedades de los materiales de los rodillos:

- Dureza y tenacidad
- Indeformabilidad
- Resistencia al desgaste
- Dureza en caliente
- Templabilidad

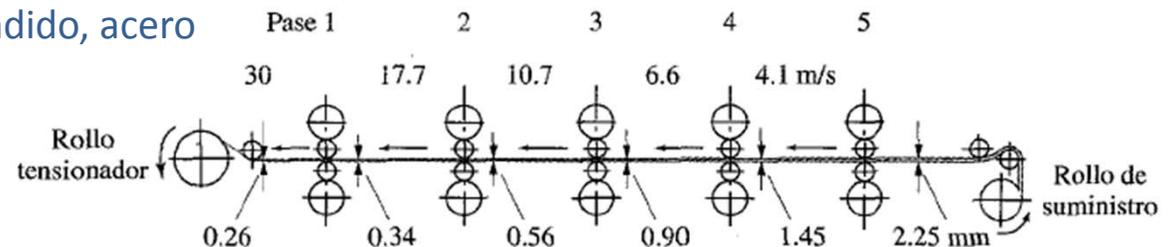
- Materiales

- Fundición de hierro, acero fundido, acero forjado...

- Lubricación

- Aceite mineral
- Grasa

### Laminación en tándem





# Índice de los procesos de deformación volumétrica

## 1. Laminación

- 1.1. Introducción
- 1.2. Análisis del proceso
- 1.3. Defectos
- 1.4. Otros procesos de laminación
- 1.5. Equipos y utillajes: Tipos de molinos

## 2. Forja

- 2.1. Introducción
- 2.2. Operaciones de forjado
- 2.3. Análisis del proceso
- 2.4. Defectos
- 2.5. Equipos y utillajes

## 3. Extrusión

- 3.1. Introducción
- 3.2. Clasificación
- 3.3. Análisis del proceso
- 3.4. Defectos

## 4. Estirado o trefilado

- 4.1. Introducción
- 4.2. Análisis del proceso
- 4.3. Defectos y esfuerzos
- 4.4. Equipos y utillajes

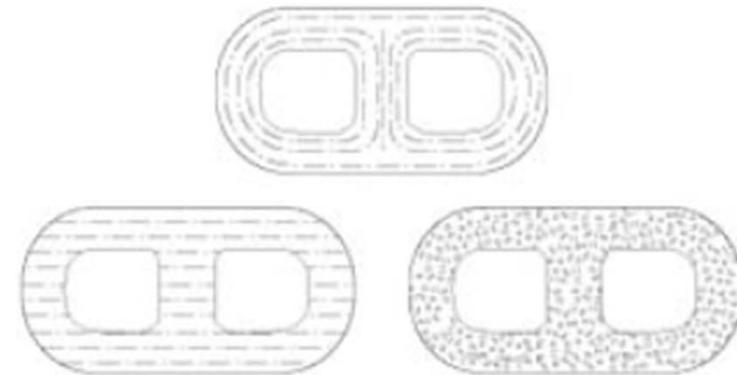


## 2.1. Introducción.

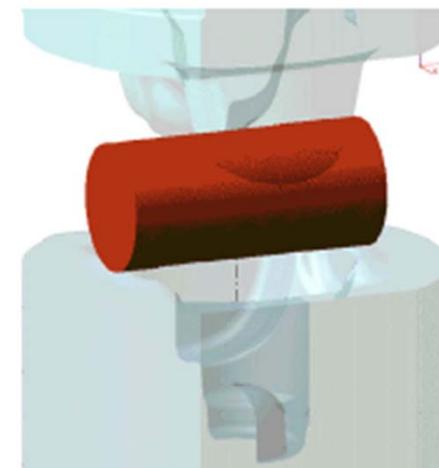
**Definición:** El forjado es un proceso en el que la pieza se conforma mediante fuerzas sucesivas de compresión, aplicadas a través de diversos dados o matrices y herramientas.

### Características:

- Mejoras en la microestructura y en la macroestructura que permite alcanzar muy buenas propiedades mecánicas.
- El forjado permite el control del flujo del metal y de la estructura del grano
- Requiere operaciones de acabado adicionales (malas tolerancias dimensionales)
  - Forjado de precisión (forma neta o forma casi neta)



*Estructura de grano (fibrado) en un producto FORJADO (arriba), MECANIZADO (izq) y FUNDIDO (dcha)*



*Proceso de FORJA CON ESTAMPAS*



## 2.1. Introducción.

### Clasificación de los procesos de forjado:

#### Temperatura de forjado

- En caliente
  - $T^a$  superior a la temperatura de recristalización de la pieza
  - Menor fuerza de forjado
- En frío
  - $T^a$  inferior a la temperatura de recristalización de la pieza
  - Mejores tolerancias geométricas y superficiales
  - Riesgo de grieta con materiales poco dúctiles

#### Tipo de proceso:

- Dado abierto o recalado
- Dado impresor
- Dado cerrado
- De precisión



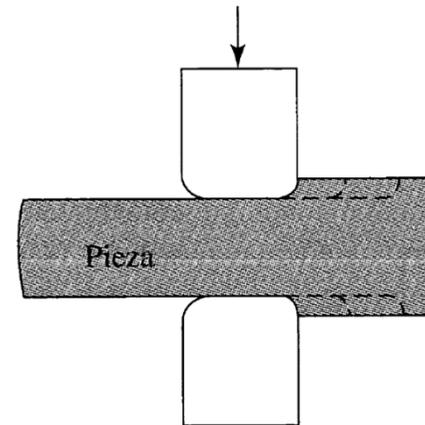
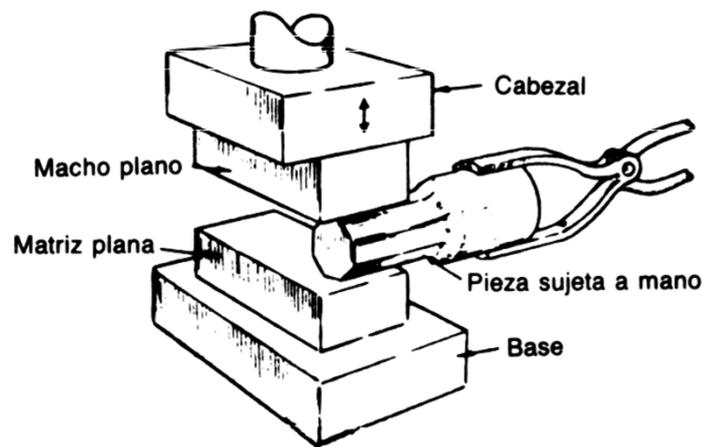
## 2.1. Introducción.

Proceso	Ventajas	Inconvenientes
Matriz abierta	Matrices sencillas poco costosas; útil para pequeñas cantidades; amplia gama de tamaños disponibles; buenas características de resistencia.	Limitado a formas sencillas; difícil mantener tolerancias estrechas; necesario el mecanizado a la forma final; poca capacidad de producción; del material; se requiere mucha destreza
Matriz cerrada	Utilización relativamente buena del material; en general mejores propiedades que las forjas con matriz abierta; buena precisión dimensional; gran capacidad de producción; buena reproducibilidad.	Gran costo de las matrices cuando las cantidades son pequeñas; con frecuencia se necesita mecanizado.
De precisión	Tolerancias cerradas; con frecuencia es innecesario el mecanizado; muy buena utilización del material; es factible con almas y bridas muy delgadas	Requiere grandes fuerzas, matrices complicadas y medios para separar la pieza forjada de las matrices.

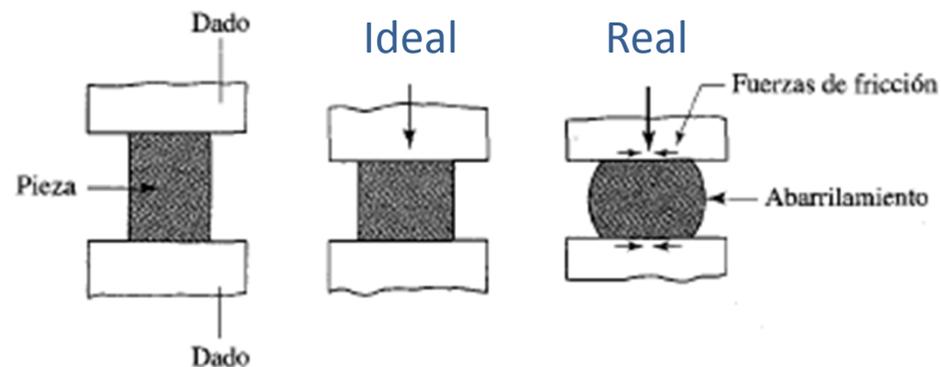


## 2.2. Forjado con matriz abierta

- Reducción de altura por compresión mediante matriz abierta



- Fuerza de fricción y/o dados fríos  $\rightarrow$  abarrilamiento  $\rightarrow$  lubricación





## 2.2. Forjado con matriz abierta

Fuerza de forjado matriz abierta y pieza cilíndrica

$$F = Y_f \cdot A \cdot K_f$$

$$F = Y_f \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \mu \cdot r}{3 \cdot h}\right)$$

$Y_f$  = Esfuerzo de fluencia

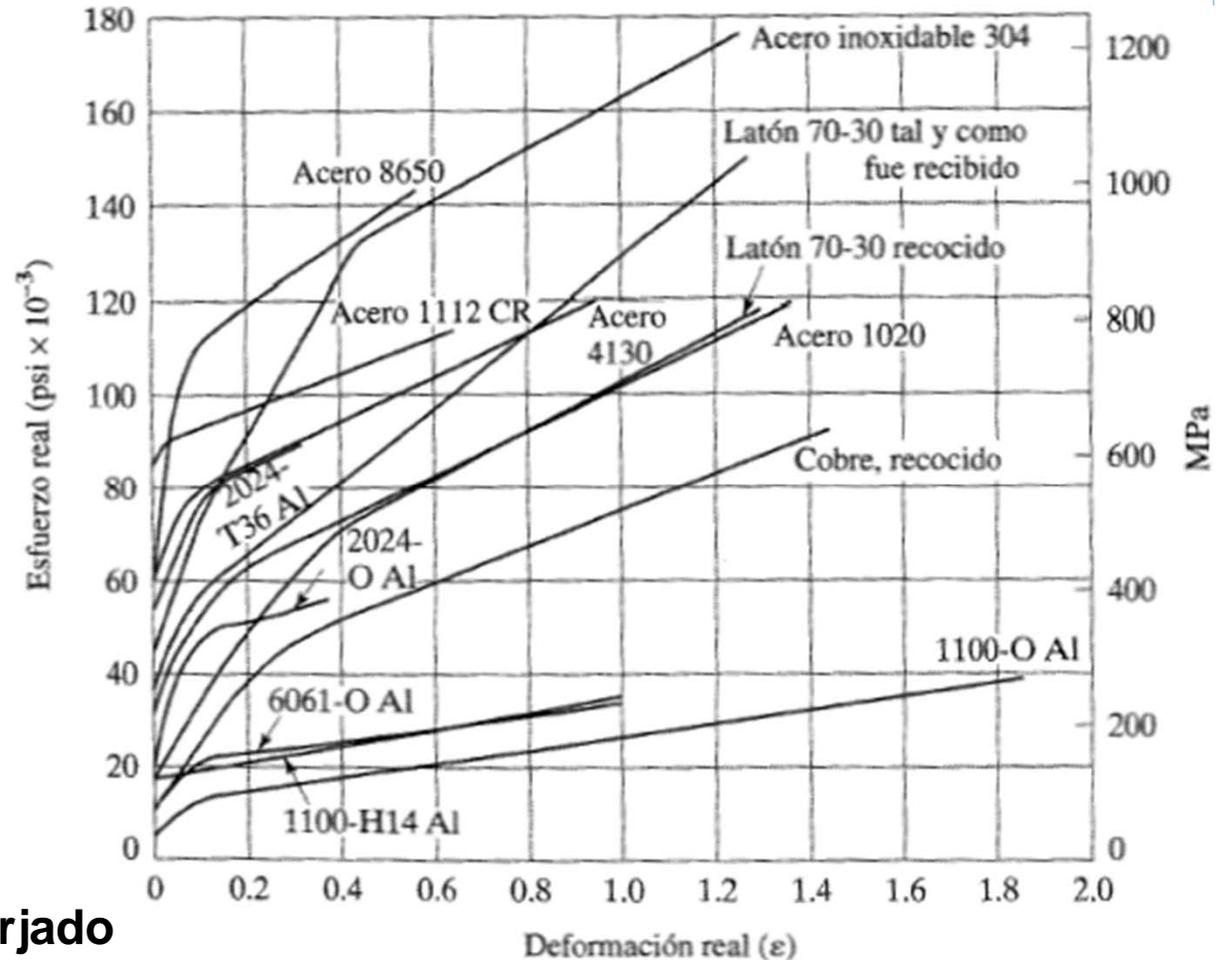
$r$  = Radio de la pieza

$\mu$  = Coeficiente de fricción

$h$  = Altura de la pieza

$K_f$  = factor de forma del forjado

$A$  = Área proyectada de la pieza forjada, incluyendo la rebaba





## 2.2. Forjado con matriz cerrada

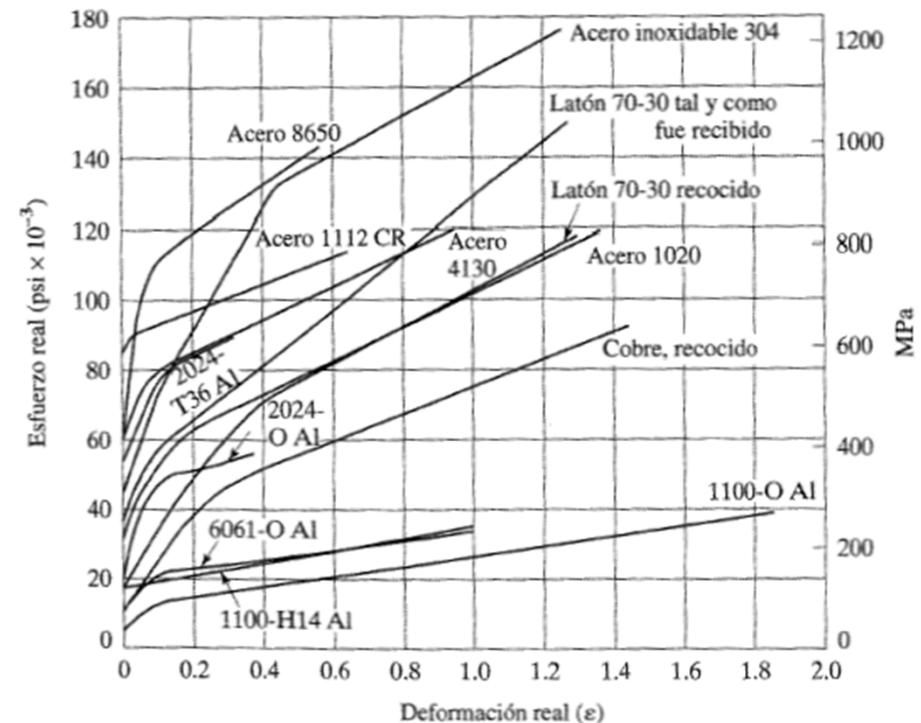
Fuerza de forjado

$$F = Y_f \cdot A \cdot K_f$$

$Y_f$  = Esfuerzo de fluencia

$A$  = Área proyectada de la pieza forjada, incluyendo la rebaba

$K_f$  = factor de forma del forjado



	Intervalos de valores de $K_f$
Formas sencillas, sin rebaba	3-5
Formas sencillas, con rebaba	5-8
Formas complejas, con rebaja	8-12



## 2.2. Análisis del proceso

### Forjado

$Y_f$  (esfuerzo de fluencia) depende de:

- Del material
- La deformación necesaria (deformación real)  $\epsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h_f}\right)$

Diferentes maneras de calcular es  $Y_f$

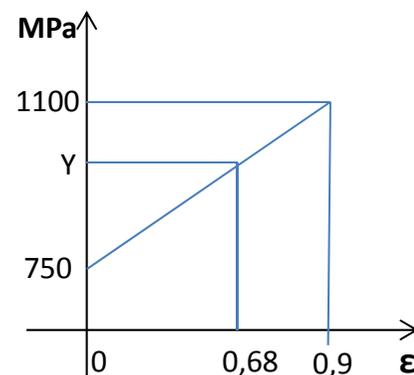
a)  $Y_f = (K \epsilon^n)$  donde n: exponente de endurecimiento por deformación

$\epsilon$ : deformación real

K: coeficiente de resistencia

b)  $Y_f$  por medio de tablas  $\rightarrow$  se calcula la deformación real en función de la variación de altura de las piezas y luego en tablas por medio de este dato y seleccionando la gráfica del material trabajo obtenemos el esfuerzo

c)  $Y_f$  nos dan valores de una curva plástica lineal donde me indica el límite elástico y el esfuerzo para una determinada deformación. Calculamos la deformación real e interpolamos entre los datos proporcionados.



$$Y_f = Y$$



## 2.2. Forjado con matriz abierta

Un tejo cilíndrico macizo de acero inoxidable 304 tiene 150 mm de diámetro y 100 mm de alto. Su altura se reduce a 50% a temperatura ambiente, mediante forjado con matrices planas y abiertas. Suponiendo que el coeficiente de fricción sea 0,2. Calcule la fuerza de forjado al final de la carrera.

a)  $K = 1200 \text{ MPa}$ ,  $n = 0,40 \implies Y_f = K \cdot \varepsilon^n$

b) Valores de la gráfica

**TABLA 2.3** Valores típicos de  $K$  y de  $n$  a temperatura ambiente

	$K$ (MPa)	$n$
Aluminio		
1100-O	180	0.20
2024-T4	690	0.16
6061-O	205	0.20
6061-T6	410	0.05
7075-O	400	0.17
Latón		
70-30, recocido	900	0.49
85-15, laminado	580	0.34
Aleación base cobalto con tratamiento térmico	2070	0.50
Cobre, recocido	315	0.54
Acero		
Bajo C, recocido	530	0.26
4135 recocido	1015	0.17
4135 laminado	1100	0.14
4340 recocido	640	0.15
304 inoxidable, recocido	1275	0.45
410 inoxidable, recocido	960	0.10



## Problema 2

Calcule la fuerza de forjado para una pieza cilíndrica maciza de acero 1020, con 3.5 pulgadas (89mm) de alto y 5 pulgadas (127mm) de diámetro. Su altura se va a reducir un 30%. El coeficiente de fricción es 0.2.

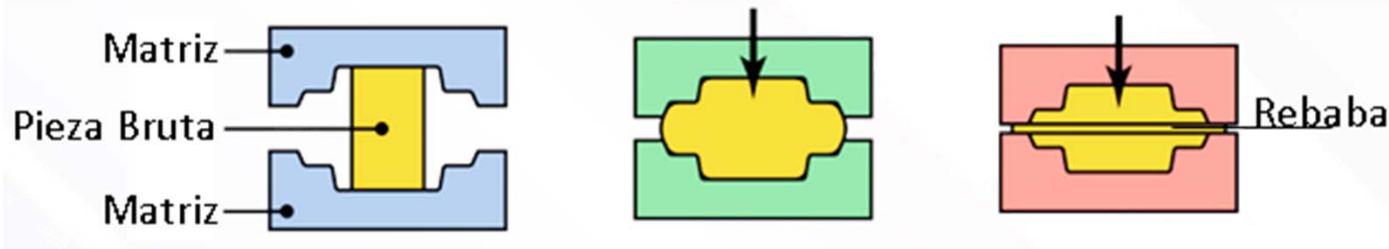
Suponga, a la temperatura de trabajo, una curva plástica lineal de límite elástico de  $375 \text{ N/mm}^2$  y a  $\text{def}=1$  una tensión de  $700 \text{ N/mm}^2$

## Problema 3

Calcular la fuerza de forjado para la pieza del problema anterior, suponiendo que es un forjado complicado y que el área proyectada de la rebaba es 40% mayor que la de la pieza forjada.

## 2.2. Forjado por matriz de impresión y cerrada

Dados con cavidades que darán forma a la pieza

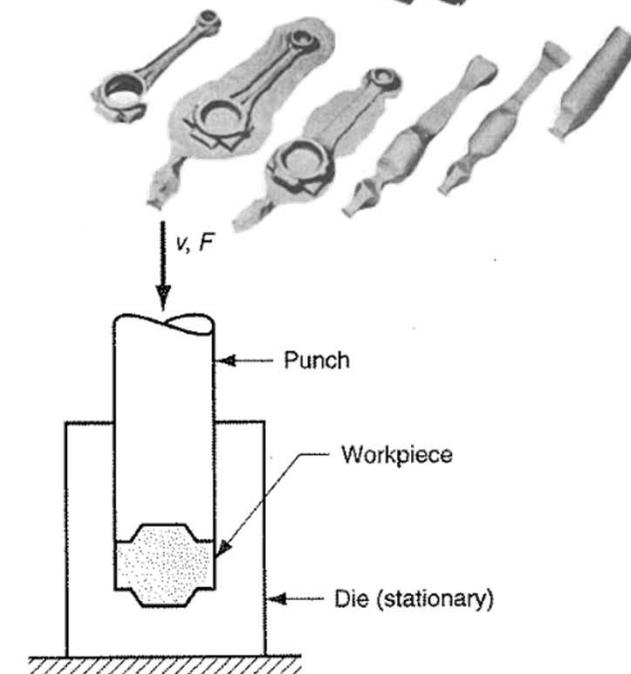


Dado impresor:

- Genera rebaba
  - Se enfría rápido, por lo que genera una zona más rígida que favorece el forjado
  - Es necesario eliminarla, por ejemplo mediante troquelado

Dado cerrado:

- Sin generación de rebaba
  - Es necesario mayor precisión de la cantidad de material que se carga (llenado incompleto o daño en los dados)





## 2.2. Forjado por matriz de impresión y cerrada

<http://www.youtube.com/watch?v=URqXEbhNQ2o>

### Fases del forjado

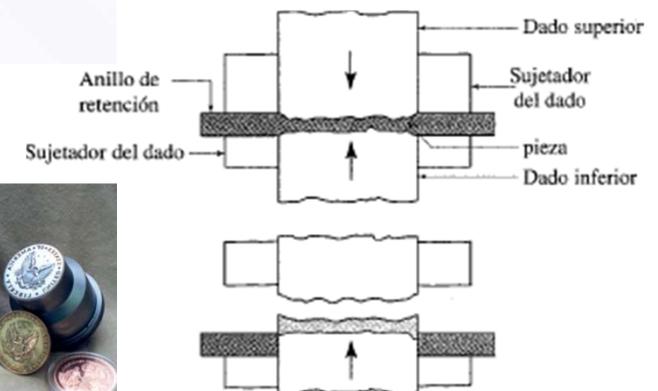
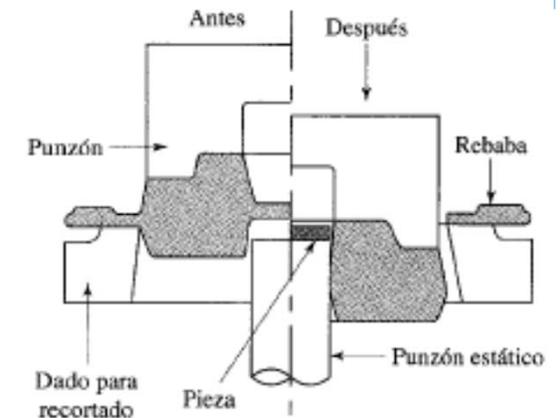
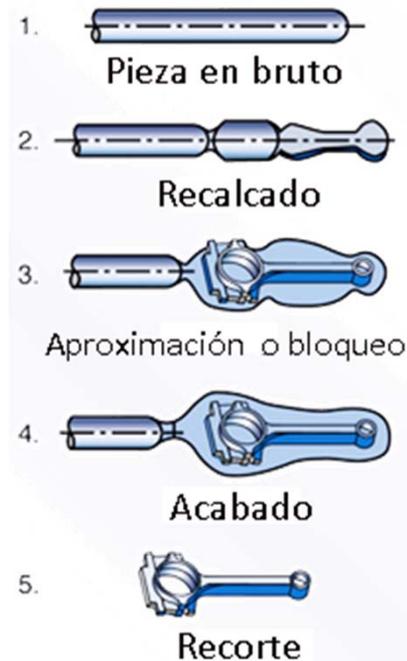
- Preparación de la pieza:
  - Recorte
  - Recalcado
- Operaciones finales:
  - Bloqueo
  - Acabado
  - Recorte (troquelado)

### Forjado de precisión

- Más costoso
- Pocos acabados

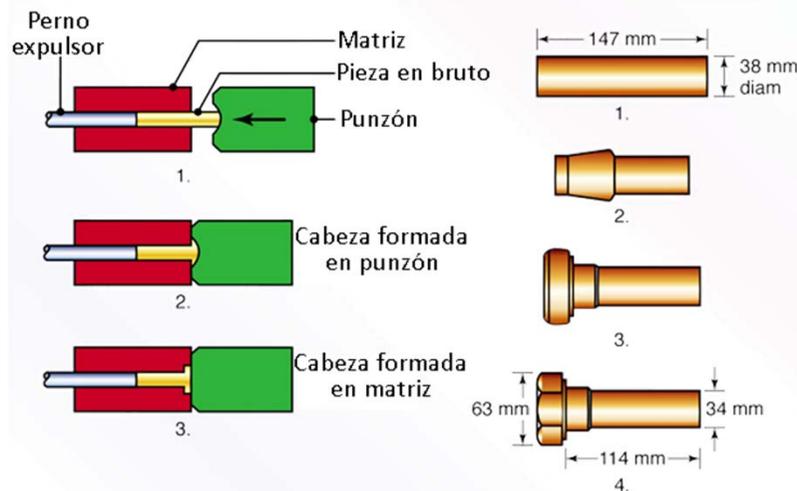
### Acuñaición

- Proceso para pequeños detalles (monedas o marcados)

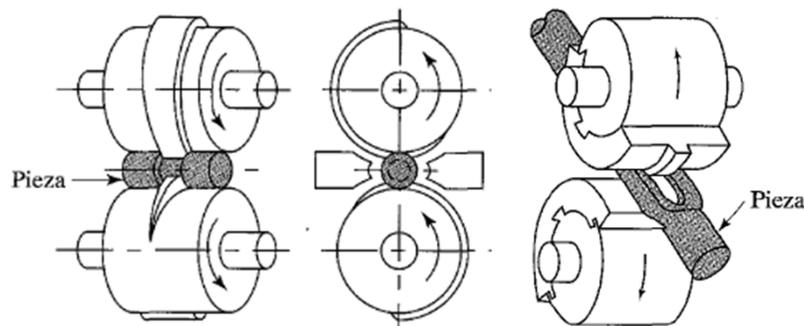


## 2.2. Diversas operaciones de forjado

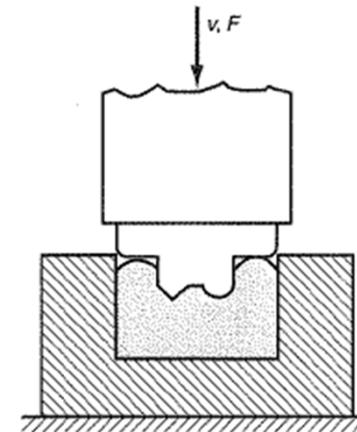
- Cabeceado (recalcado)



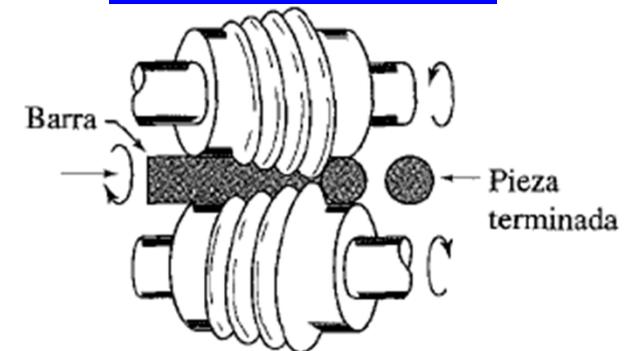
- Laminado forjado o forjado laminar



- Punzonado de cavidades



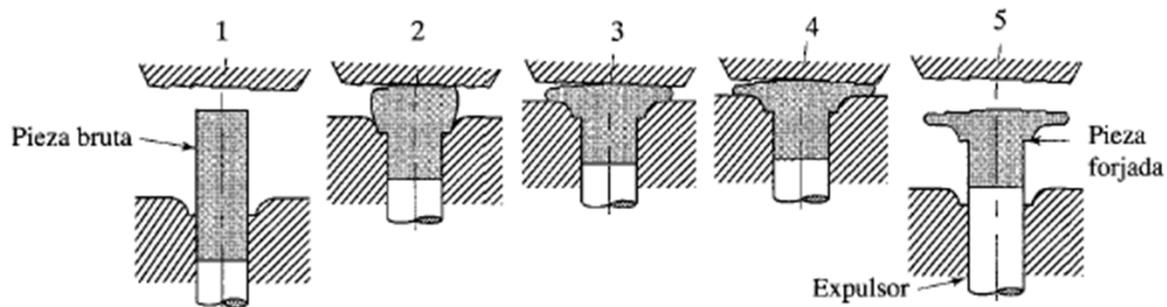
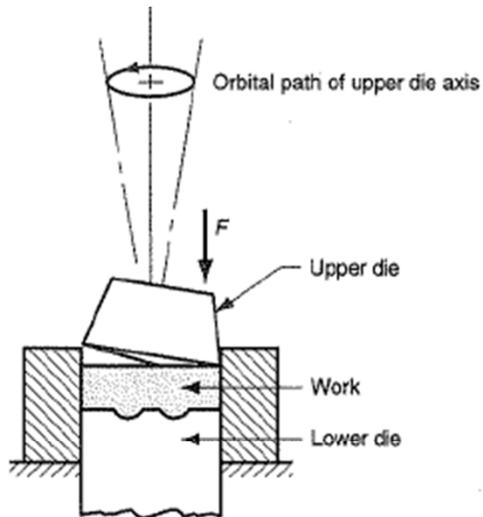
- Laminado inclinado



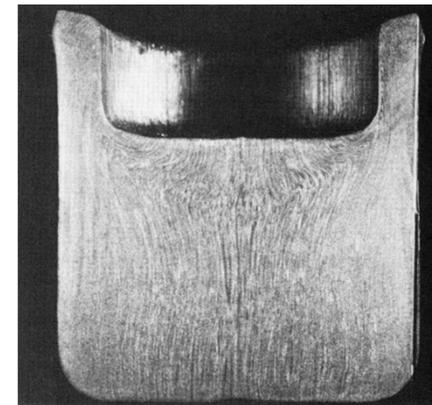


## 2.2. Diversas operaciones de forjado

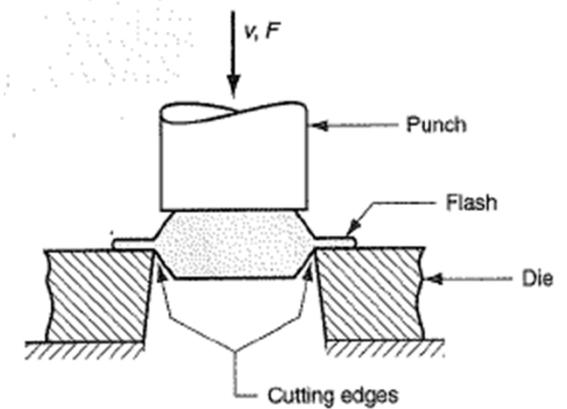
- Forjado orbital



- Penetrado



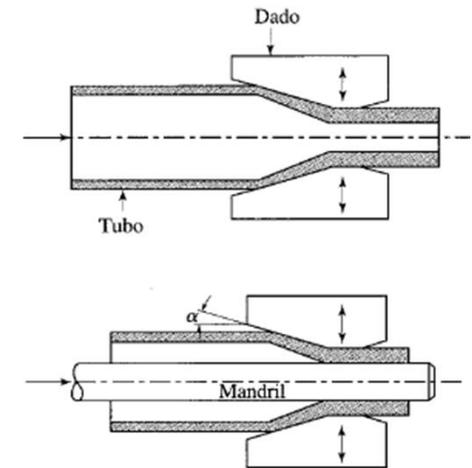
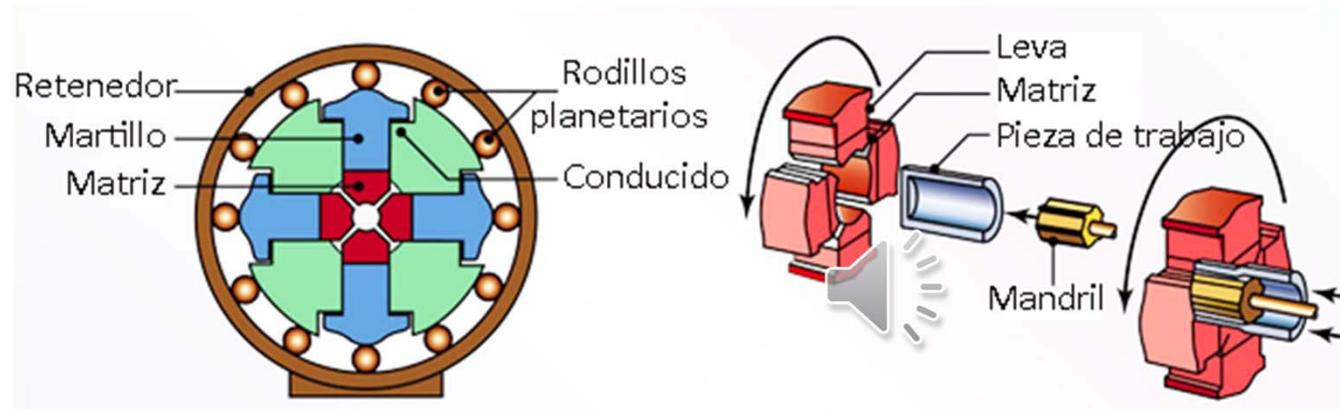
- Recortado





## 2.2. Diversas operaciones de forjado

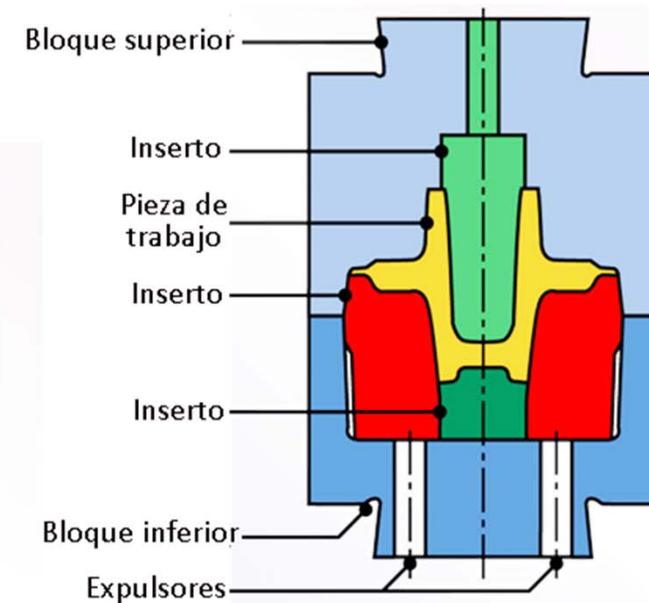
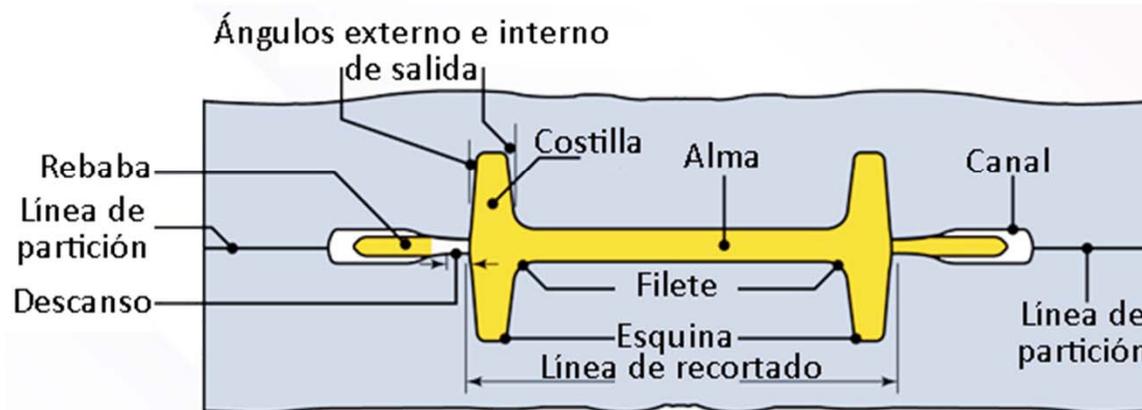
- Forjado rotatorio



- Forjado isotérmico
- Forjado incremental

## 2.3. Diseño de matrices

- La línea de partición puede no estar en un solo plano, sobre todo en piezas complejas
- Ángulos de salida, internos  $7^{\circ}$ - $10^{\circ}$ , externos  $3^{\circ}$ - $5^{\circ}$
- Radios de transición en esquinas y biseles lo mayores posible
- Dados ensamblados con insertos
- Creces en el diseño para el mecanizado posterior
- Canal de rebaba -- fuerza de forjado





## 2.3. Diseño de matrices

### Calidad, tolerancias y acabado superficial del forjado

- Tolerancias entre  $\pm 0.5$  y  $\pm 1\%$  de las dimensiones de la forja
- Las tolerancias dependen de:
  - Los ángulos de salida y los radios de la pieza
  - El desgaste del dado
  - El cerrado del dado
  - Falta de coincidencia de los dados
- El acabado superficial depende de:
  - La eficacia del lubricante
  - La preparación de la pieza
  - El acabado superficial y el desgaste del dado.





## 2.3. Materiales y lubricación

- Materiales de los dados
  - Propiedades:
    - Resistencia y tenacidad a temperaturas elevadas
    - Capacidad de endurecimiento y de endurecerse uniformemente
    - Resistencia al choque térmico y mecánico
    - Resistencia al desgaste, en especial al desgaste abrasivo, por la presencia de cascarilla en la forja en caliente
  - Selección:
    - Según el tamaño de pieza, la composición y las propiedades de la pieza
    - La complejidad de la forma, la temperatura de forjado y el tipo de operación
    - El costo de los materiales del dado y la cantidad requerida de forjas
  - Materiales: Aceros para herramienta
- Lubricación
  - Influyen sobre la fricción y el desgaste, y por consiguiente sobre las fuerzas requeridas
  - También influye en el flujo del metal en las cavidades.
  - Actúan como barrera térmica entre la pieza caliente y los dados fríos
  - También sirven como agente de desprendimiento, evitando que la pieza forjada se pegue al dado
  - Variedades
    - Para forja en caliente: grafito, disulfuro de molibdeno y, a veces, vidrio, aplicados sobre el dado
    - Para la forja en frío: aceites minerales y jabones, aplicados sobre la pieza



## 2.3. Materiales y lubricación

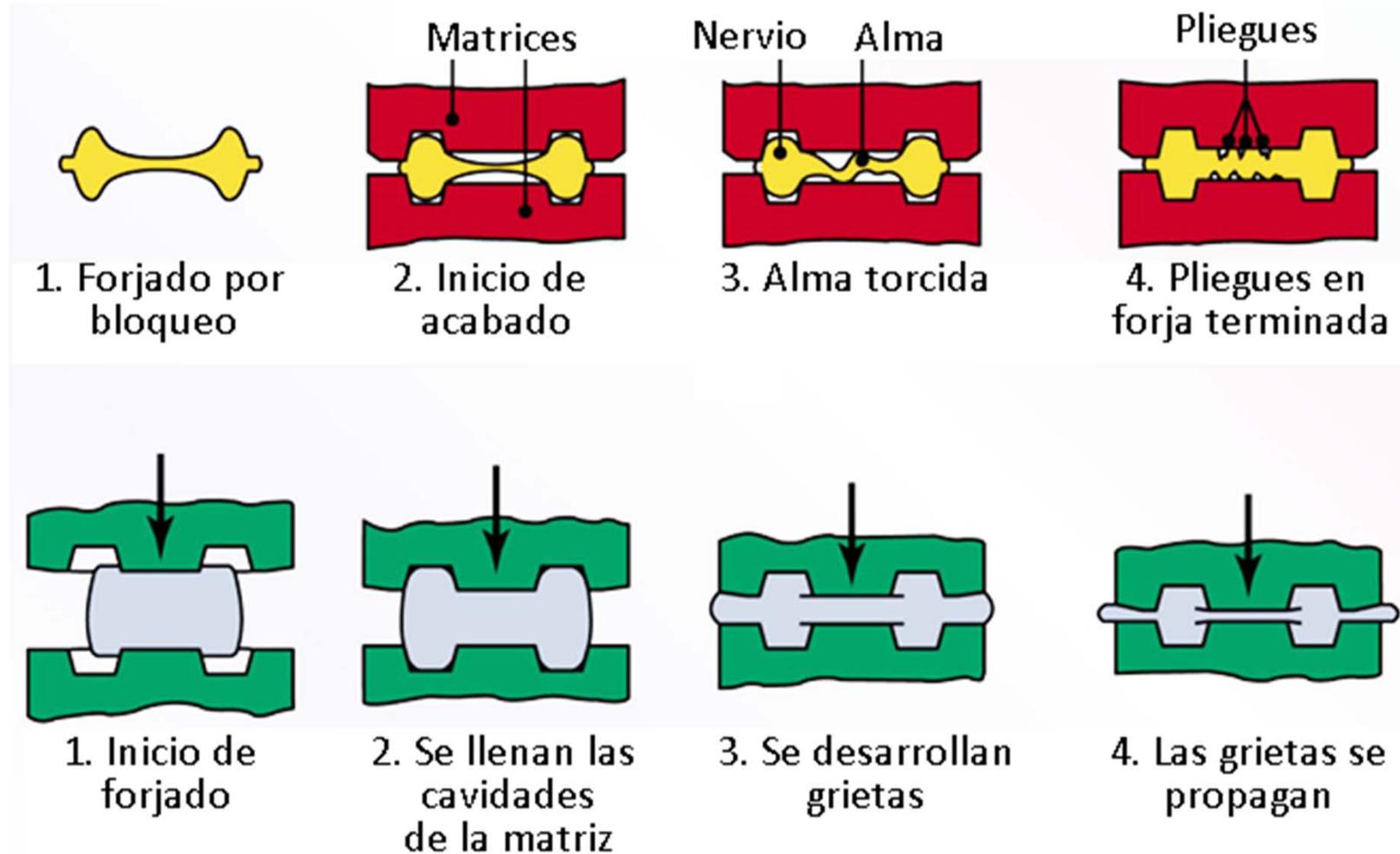
- La forjabilidad es la capacidad de un material de sobrellevar una deformación sin romperse. Recalcado y Torsión en caliente
- Materiales:

### Clasificación de los metales por forjabilidad decreciente

Metal o aleación	Intervalo aproximado de temperatura para forjado en caliente (°C)
Aleaciones de aluminio	400–550
Aleaciones de magnesio	250–350
Aleaciones de cobre	600–900
Aceros al carbono y de baja aleación	850–1150
Aceros inoxidable martensíticos	1100–1250
Aceros inoxidable austeníticos	1100–1250
Aleaciones de titanio	700–950
Superaleaciones ferrosas	1050–1180
Superaleaciones a base de cobre	1180–1250
Aleaciones de tantalio	1050–1350
Aleaciones de molibdeno	1150–1350
Superaleaciones a base de níquel	1050–1200
Aleaciones de tungsteno	1200–1300

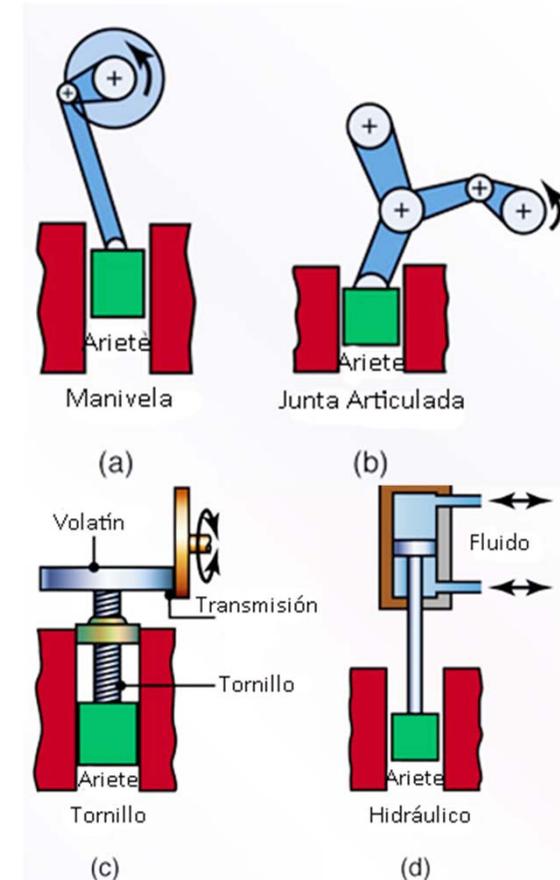
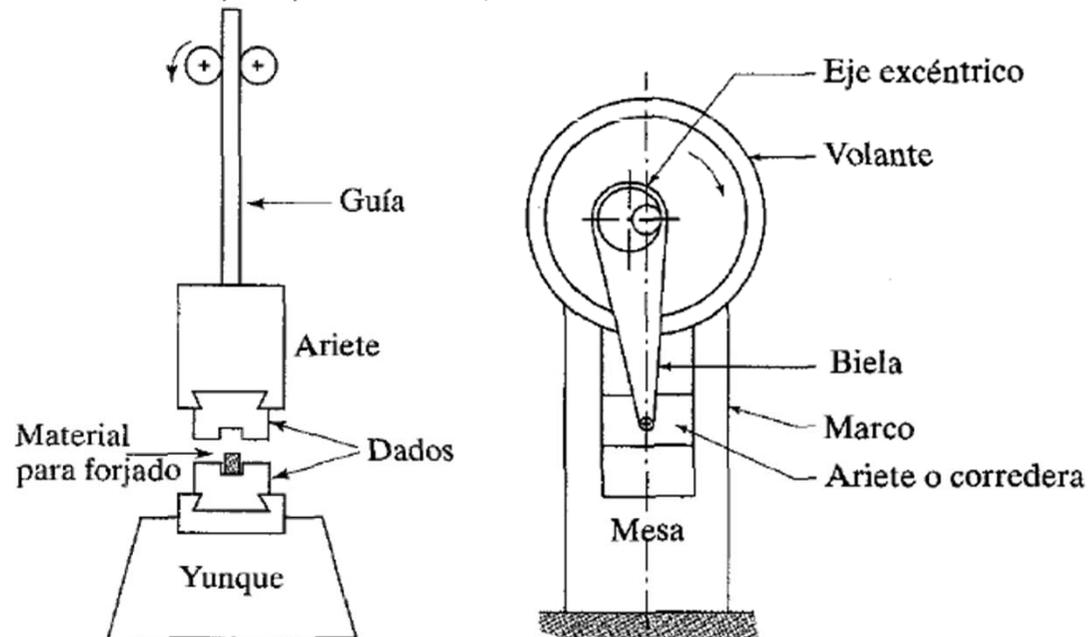


## 2.4. Defectos de forjado



## 2.5. Máquinas para forjado

- Prensas: hidráulicas, mecánicas, de tornillo.  
Su capacidad viene definida por la **fuerza** disponible en la carrera de bajada de la estampa
- Martinetes: de gravedad, de accionamiento por energía, de contragolpe, de gran potencia.  
Su capacidad viene definida por la **energía** disponible en el momento de impacto
- Características: Carrera, Fuerza, Velocidad, Golpes por minuto, Potencia



Equipo	m/s
Prensa hidráulica	0.06–0.30
Prensa mecánica	0.06–1.5
Prensa de tornillo	0.6–1.2
Martinete de gravedad	3.6–4.8
Martillo accionado por energía	3.0–9.0
Martinete de forja	4.5–9.0



# Índice de los procesos de deformación volumétrica

## 1. Laminación

- 1.1. Introducción
- 1.2. Análisis del proceso
- 1.3. Defectos
- 1.4. Otros procesos de laminación
- 1.5. Equipos y utillajes: Tipos de molinos

## 2. Forja

- 2.1. Introducción
- 2.2. Operaciones de forjado
- 2.3. Análisis del proceso
- 2.4. Defectos
- 2.5. Equipos y utillajes

## 3. Extrusión

- 3.1. Introducción
- 3.2. Clasificación
- 3.3. Análisis del proceso
- 3.4. Defectos

## 4. Estirado o trefilado

- 4.1. Introducción
- 4.2. Análisis del proceso
- 4.3. Defectos y esfuerzos
- 4.4. Equipos y utillajes

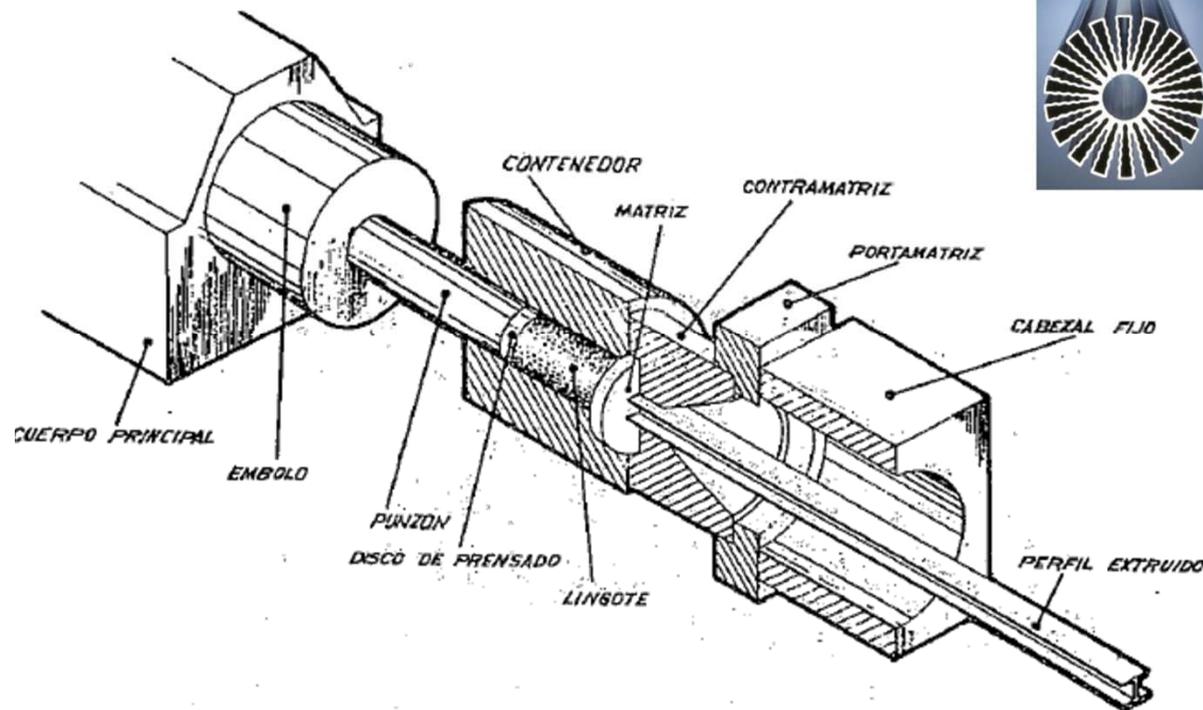
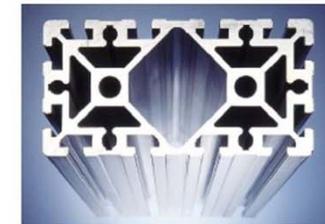


## 3.1. Introducción

**Definición:** La extrusión es una operación mediante la que se reduce la sección transversal de varillas, alambres o tubos forzándolos a pasar por una matriz.

Se realiza en frío (para piezas pequeñas) o en caliente.

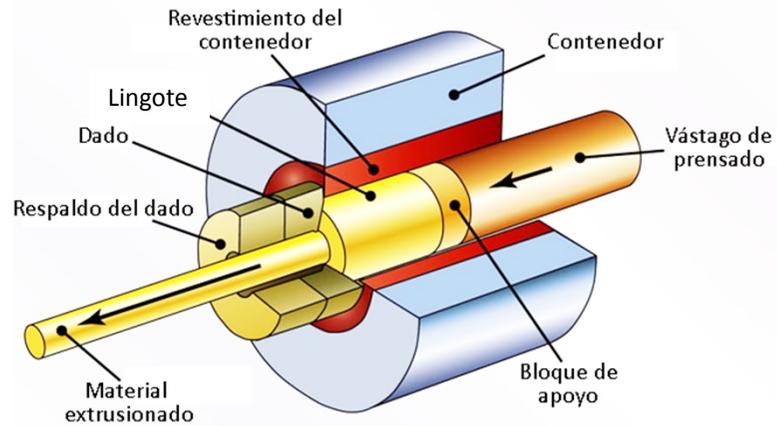
Los materiales más utilizados son: Al, Cu, Pb, Mg y sus aleaciones, aceros y aceros inox.



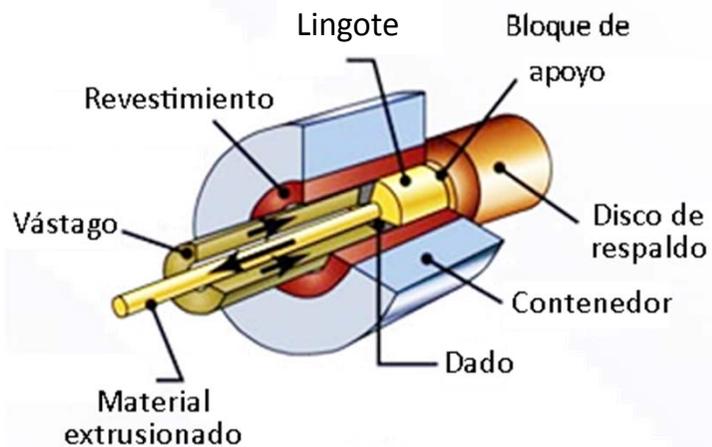


## 3.2. Clasificación

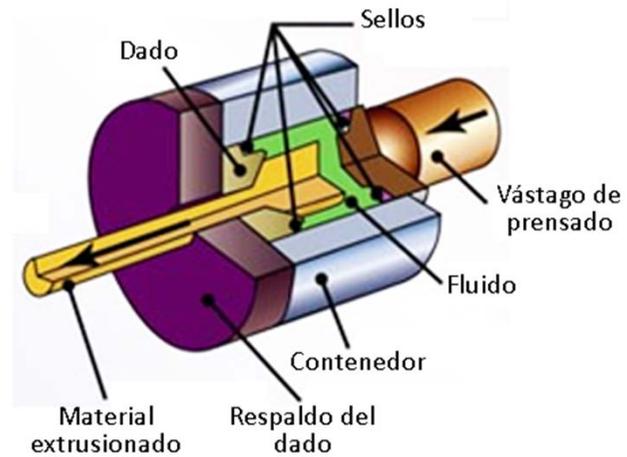
### Extrusión directa



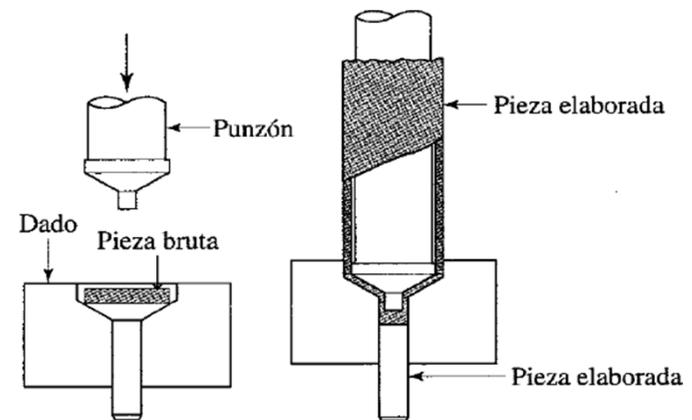
### Extrusión indirecta



### Extrusión hidrostática

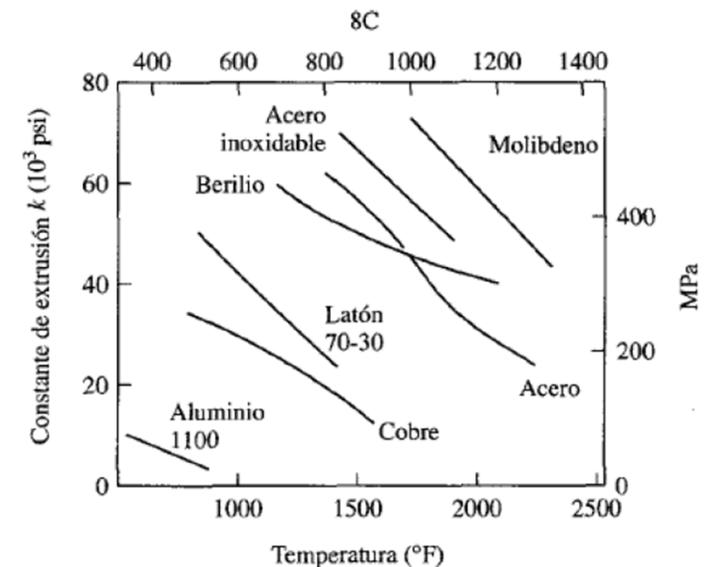
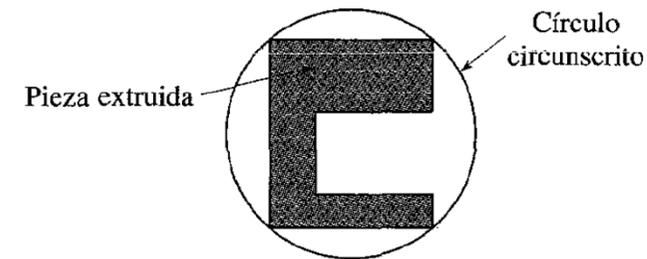
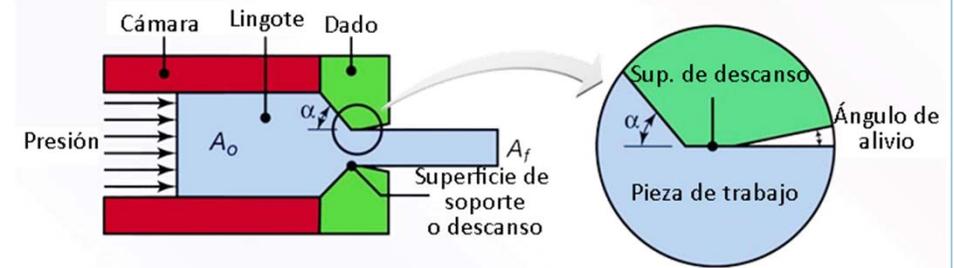


### Extrusión por impacto



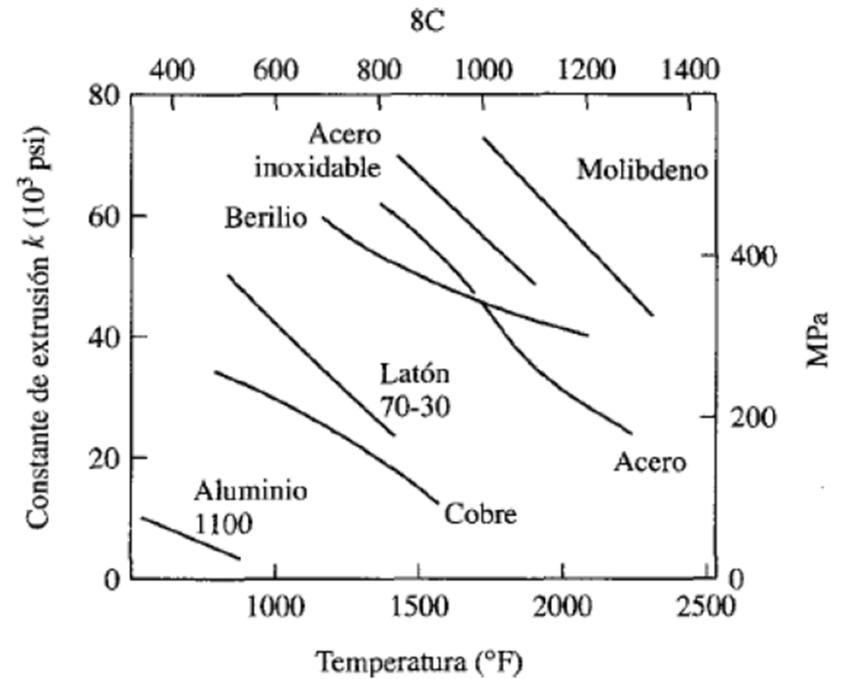
## 3.3. Proceso de extrusión

- Variables: Ángulo de la matriz, reducción del área transversal, velocidad, Tª pieza, lubricación
- Relación de extrusión (R) 
$$R = \frac{A_0}{A_f}$$
- Diámetro del círculo circunscrito (DCC)
- Factor de forma 
$$\frac{\text{Perímetro extruido}}{\text{Area Transversal}}$$
- Fuerza de extrusión 
$$F = A_0 \cdot k \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$
- Constante de extrusión (k) depende de: material, velocidad, tipo de proceso, ángulo de la matriz, lubricación....
- Se realiza mediante prensas hidráulicas





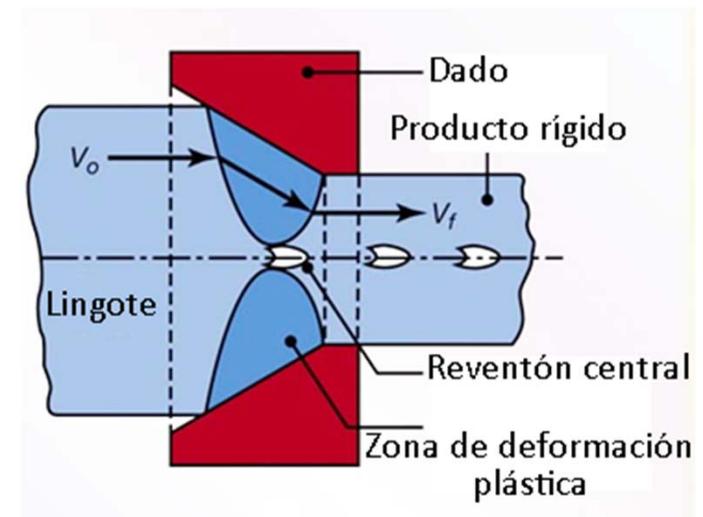
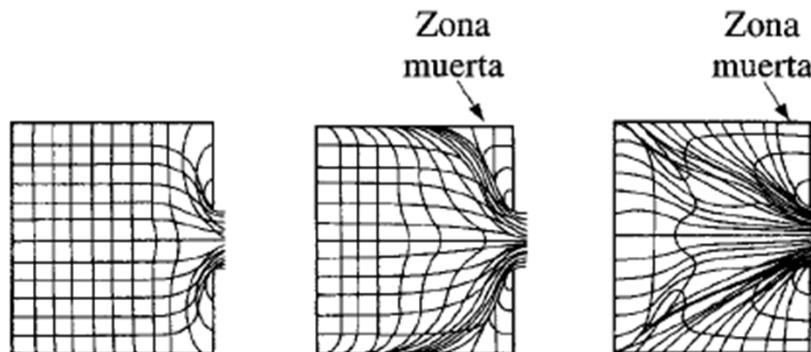
Un lingote redondo de latón se extruye a  $675^{\circ}\text{C}$ . El diámetro de la palanquilla es de 125mm y el de la extrusión 50mm. Calcule la fuerza de extrusión requerida en toneladas.



## 3.4. Defectos de la extrusión

### Defectos:

- Grietas superficiales
  - Longitudinales: Exceso de velocidad
  - Transversales: Adhesión periódica de material a la matriz
- Grietas interiores por exceso de tensiones
- Defecto de tubo, por inclusiones de óxidos en el interior





# Índice de los procesos de deformación volumétrica

## 1. Laminación

- 1.1. Introducción
- 1.2. Análisis del proceso
- 1.3. Defectos
- 1.4. Otros procesos de laminación
- 1.5. Equipos y utillajes: Tipos de molinos

## 2. Forja

- 2.1. Introducción
- 2.2. Operaciones de forjado
- 2.3. Análisis del proceso
- 2.4. Defectos
- 2.5. Equipos y utillajes

## 3. Extrusión

- 3.1. Introducción
- 3.2. Clasificación
- 3.3. Análisis del proceso
- 3.4. Defectos

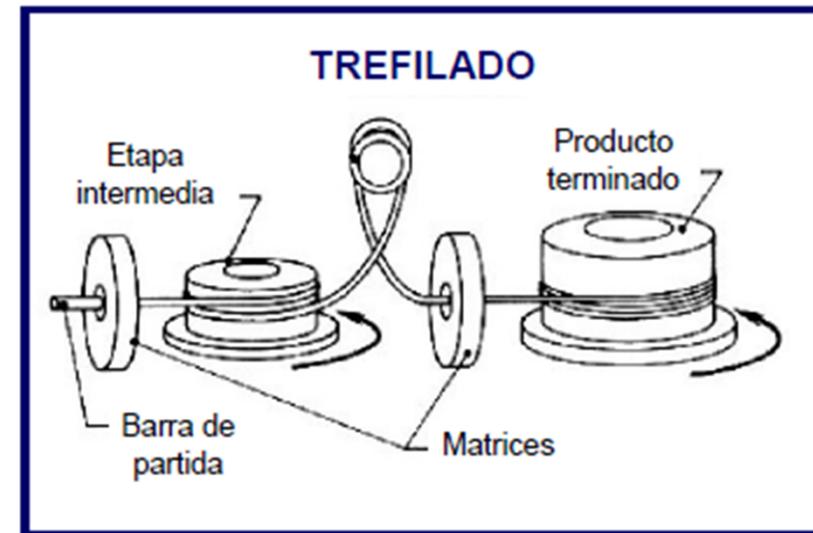
## 4. Estirado o trefilado

- 4.1. Introducción
- 4.2. Análisis del proceso
- 4.3. Defectos y esfuerzos
- 4.4. Equipos y utillajes



## 4.1. Introducción

- El **estirado** es un proceso de deformación aplicado a barras o tubos, en el que su sección transversal es reducida al obligarla a pasar, mediante fuerzas de estirado, por un orificio calibrado denominado hilera.
- Se habla de **trefilado** cuando las secciones inicial y final son circulares, por lo que únicamente se produce una reducción de diámetro. Se utiliza en la producción de cable eléctrico y de comunicaciones.

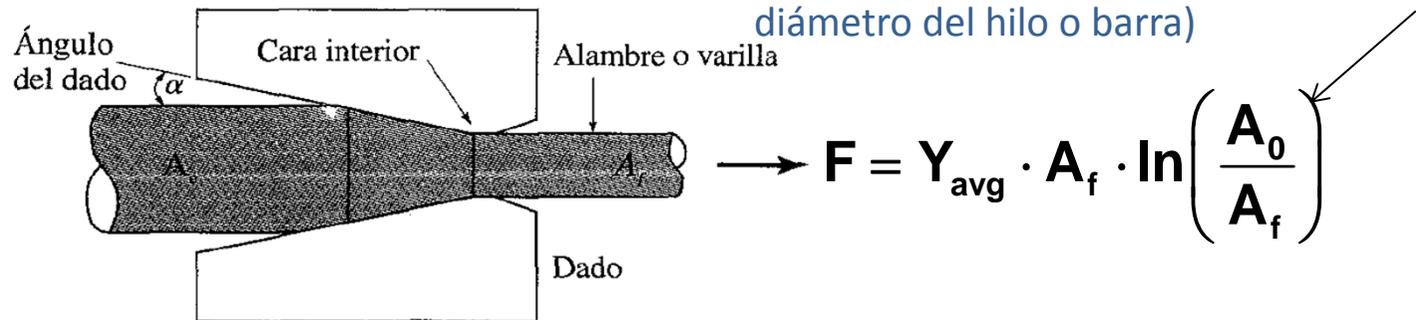




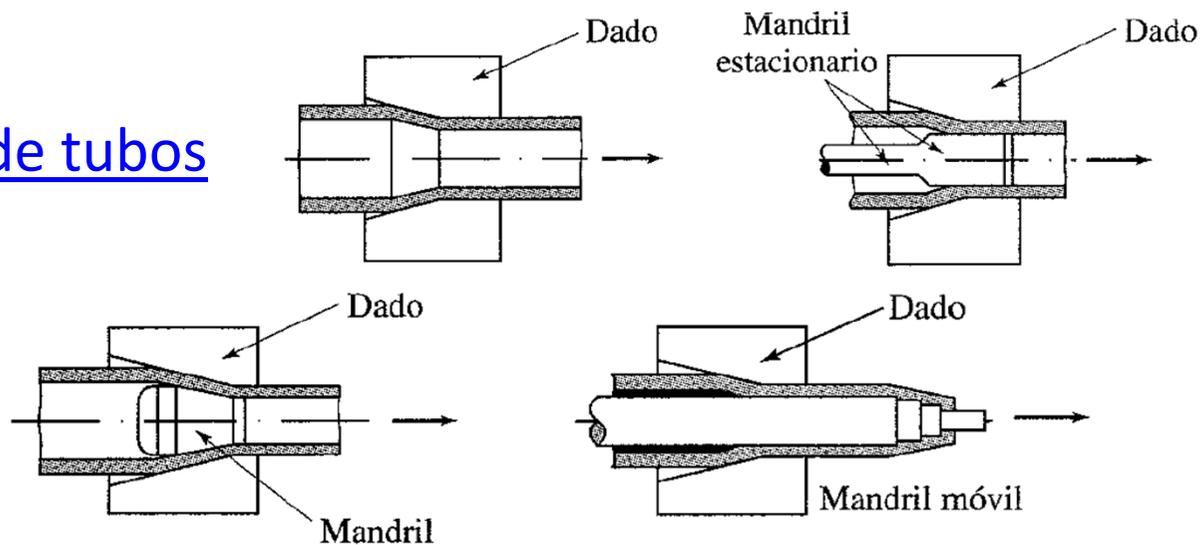
## 4.1. Procesos

### Estirado o trefilado

(trefilado si se produce únicamente una reducción del diámetro del hilo o barra)



### Estirado de tubos





Se estira a través de varias hileras un alambre de aluminio ( $K = 175 \text{ MPa}$ ,  $n = 0,2$ ) de un diámetro inicial de 8 mm a uno final de 5 mm, el ángulo de los dados es de  $8^\circ$ , la reducción del área por paso es del 20%. Calcula la fuerza teórica necesaria para hacer pasar el alambre por la primera hilera (considerar la situación ideal sin fuerzas de rozamiento)

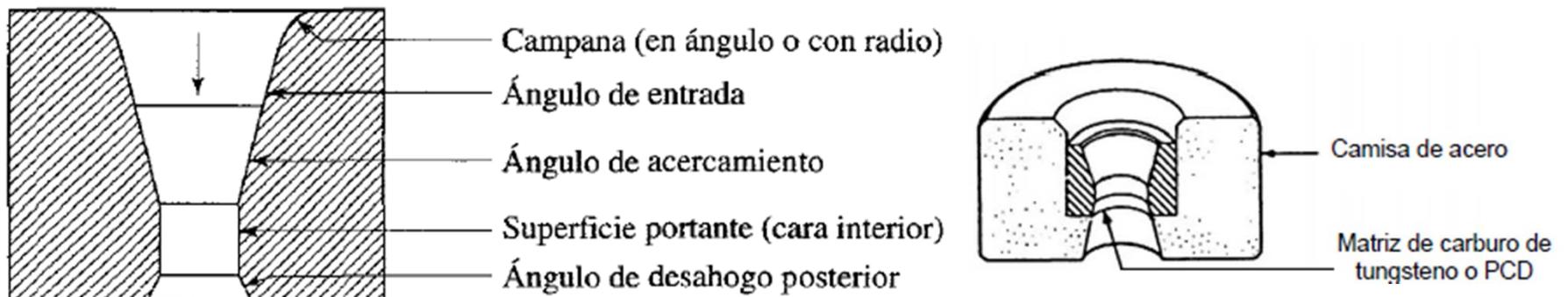
## 4.1. Procesos: Estirado o trefilado

Reducción por paso:

- Alambres finos: Del 15 al 25% de reducción por paso
- Alambres gruesos: Del 20 al 45% de reducción por paso

Diseño de matrices

- Embocadura o campana
- Cono de reducción (ángulo de acercamiento)
- Calibrado (superficie portante)
- Cono de salida (ángulo de desahogo)





## 4.2. Defectos y esfuerzos

### Defectos

- Agrietamiento del centro
- Traslapes
- Abertura de costuras en operaciones posteriores
- Defectos superficiales

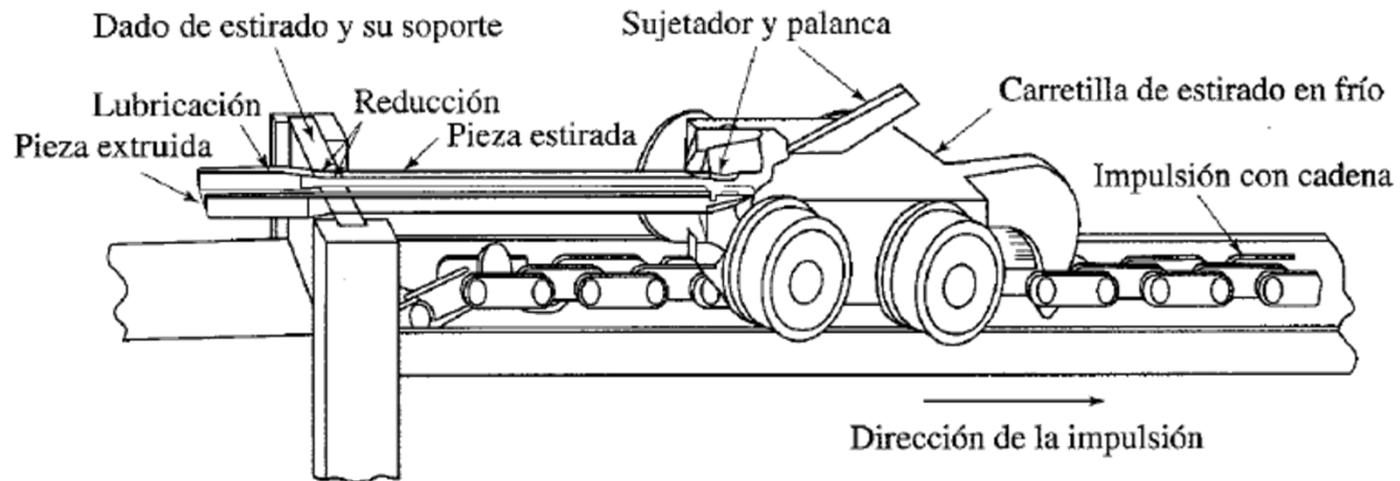
### Esfuerzos residuales

- Por deformación no uniforme en estirado en frío
- Pueden provocar agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos

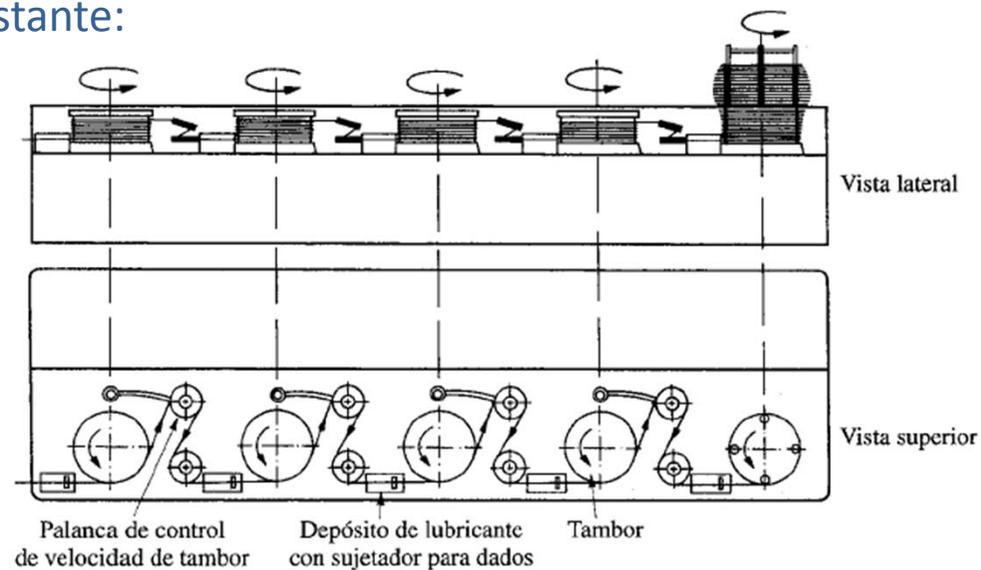


## 4.3. Equipos y utillajes

Banco de estirado:



Hilera o cuadro cabrestante:





# Índice de los procesos de deformación parcial

## 1. Fundamentos de deformación de lámina metálica

### 2. Corte

- 2.1. Descripción del proceso
- 2.2. Análisis del proceso
- 2.3. Equipos y utillajes

### 3. Embutición

- 3.1. Descripción del proceso
- 3.2. Análisis del proceso
- 3.3. Defectos
- 3.4. Equipos y utillajes
- 3.5. Ejemplo

### 4. Plegado

- 4.1. Descripción del proceso
- 4.2. Análisis del proceso
- 4.3. Defectos
- 4.4. Curvado de tubos
- 4.5. Equipos y utillajes

### 5. Otras operaciones de deformación de lámina metálica

- 5.1. Procesos de deformación con hule
- 5.2. Rechazado o entallado



# 1. Fundamentos de deformación de lámina metálica

Los procesos de **conformado por deformación plástica** son aquellos en los que la forma final de la pieza de trabajo se obtiene **por deformación de la pieza de partida, sin eliminación o aportación de material.**

## Ventajas:

- En fundición no se consiguen propiedades mecánicas adecuadas y homogéneas
- Obtención de formas y tamaños variados
- Coste

## Objetivos del estudio del conformado por deformación plástica:

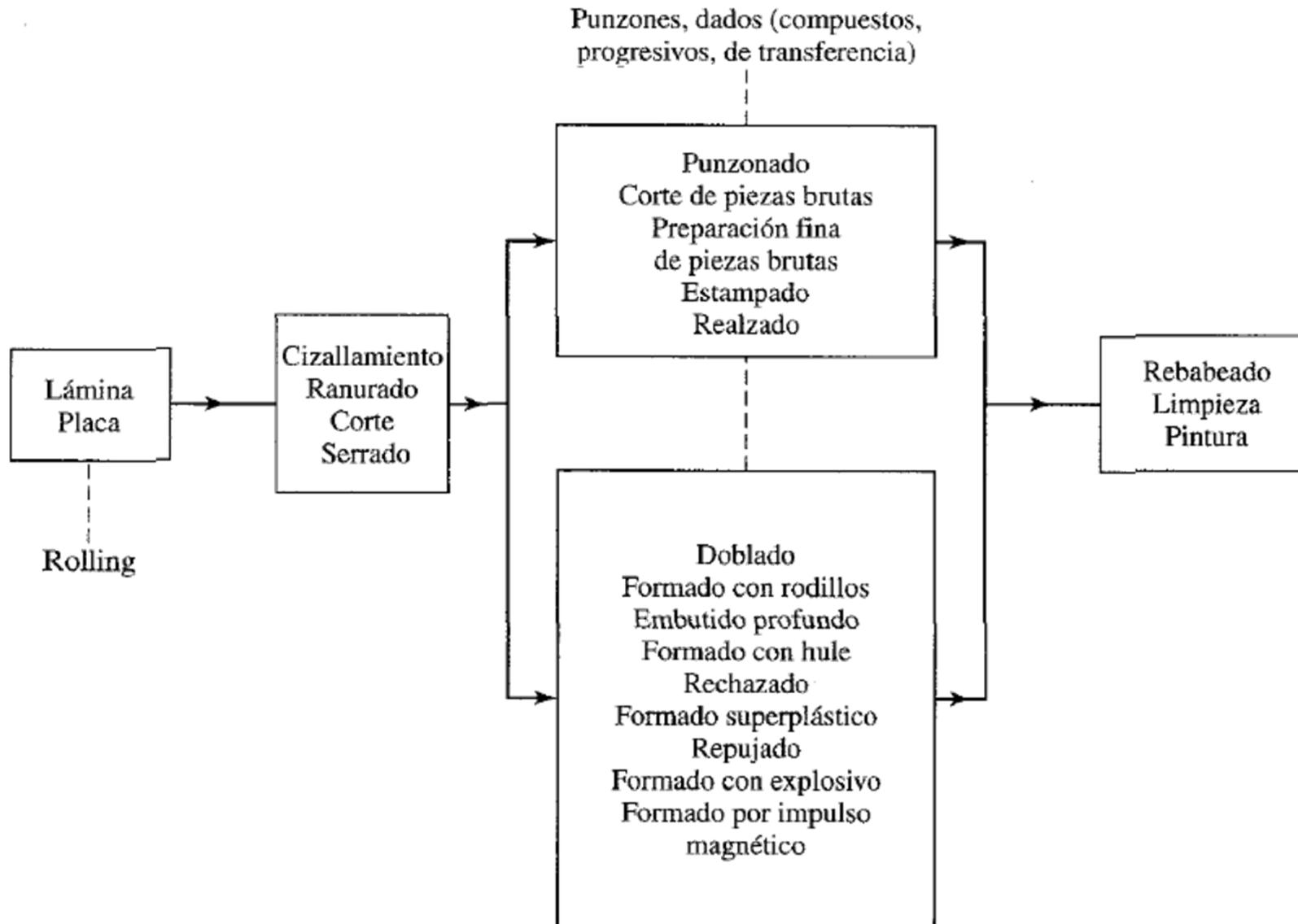
- Calcular las tensiones que actúan durante la deformación del metal.
- Calcular las fuerzas que se deben aplicar.
- Determinar la potencia requerida y el tamaño de equipo para la operación

Los procesos de deformación se dividen en:

- Deformación volumétrica
- **Deformación de lámina metálica**



# 1. Fundamentos de deformación de lámina metálica

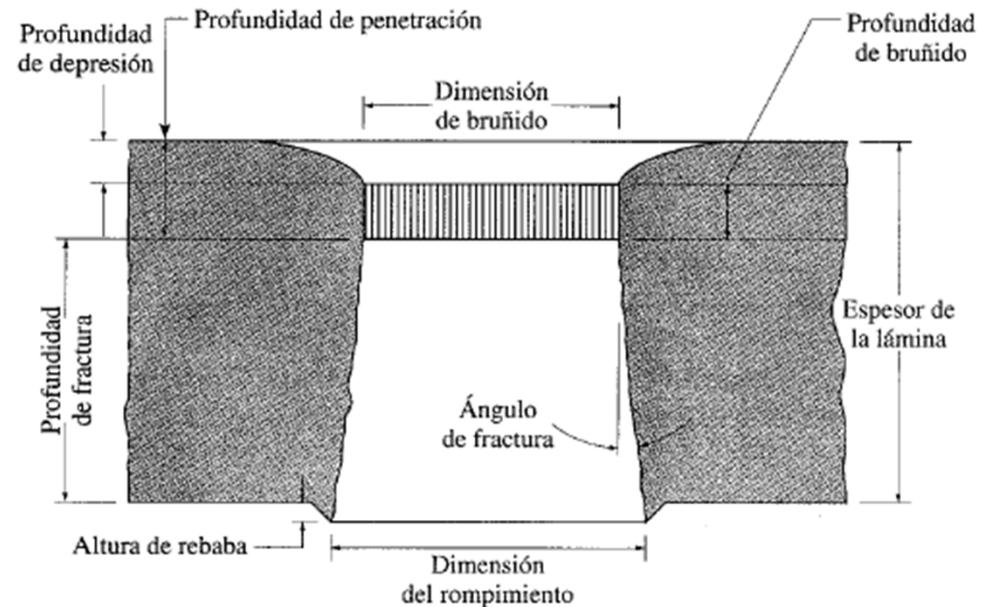
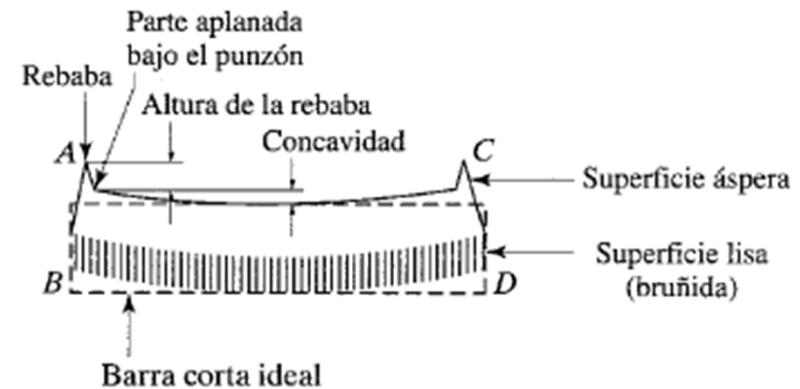
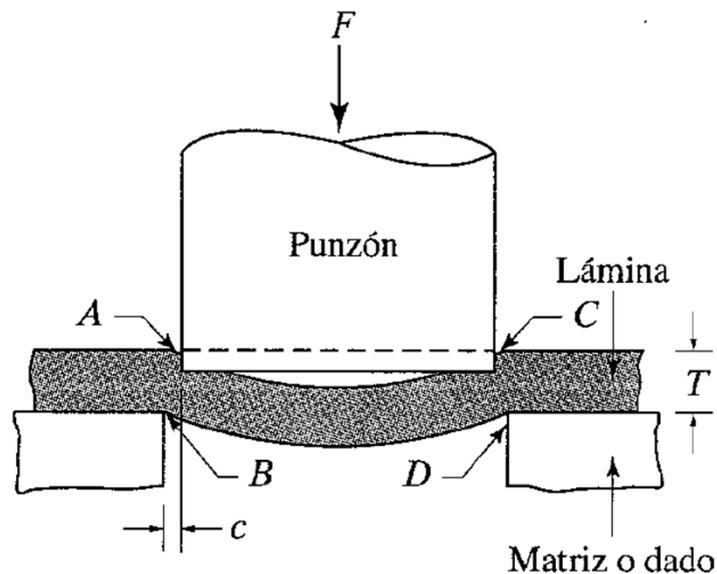


## 2. Corte: Descripción

Operación de corte de una lámina de metal a lo largo de una línea recta

**Cizallado** mediante punzón

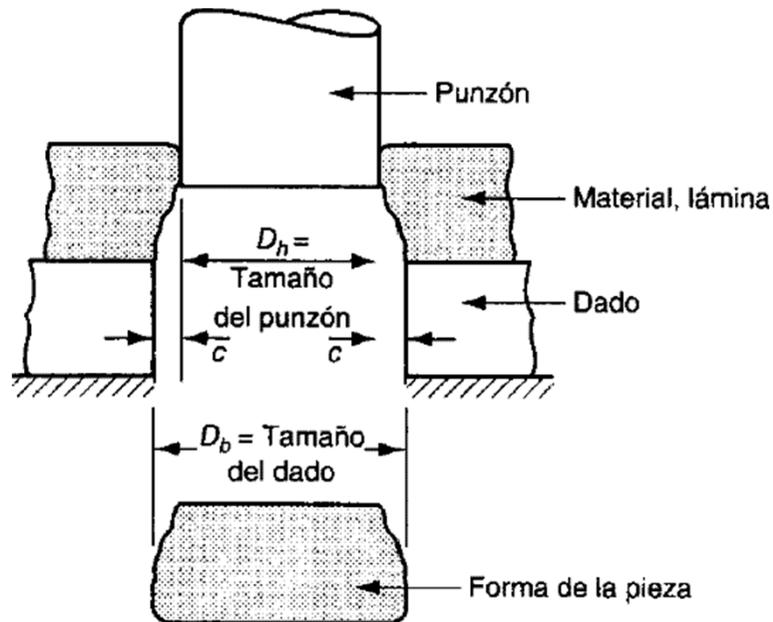
- Holgura
- Rebaba o filo



## 2. Corte: Análisis del proceso

### Parámetros principales:

- Forma y materiales del punzón y de la matriz
- Velocidad del punzonado
- Lubricación
- Holgura: Determina la forma y la calidad de la orilla o borde cortado. Y es función del material, temple, espesor, tamaño de preforma, proximidad a las orillas



Fuerza de punzonado:  $F = 0,7 \cdot T \cdot L \cdot (UTS)$

- Espesor de lámina (T)
- Perímetro de corte (L)
- Resistencia a la tensión máxima del material (UTS)
- Holgura
- Lubricación

Fuerza de extracción del punzón:

- A partir de la fuerza de punzonado



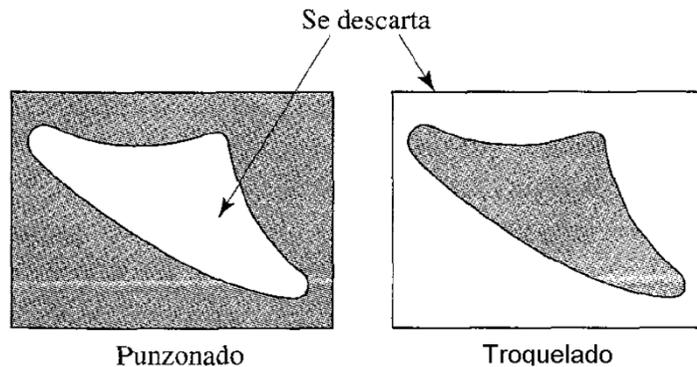
Estime la fuerza para cortar, a temperatura ambiente, un orificio de 25mm de diámetro a través de una lámina de 3.2mm de aleación de titanio Ti-6Al-4V recocida. El esfuerzo de fluencia es de 880 MPa, el esfuerzo de rotura es de 1000MPa.



## 2. Corte: Análisis del proceso

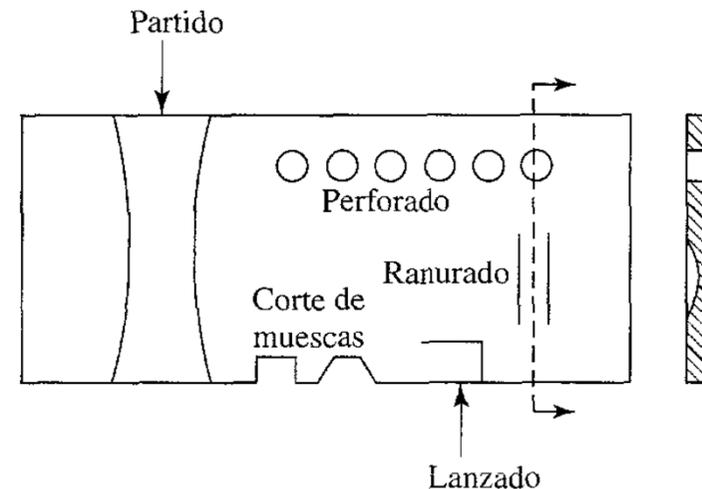
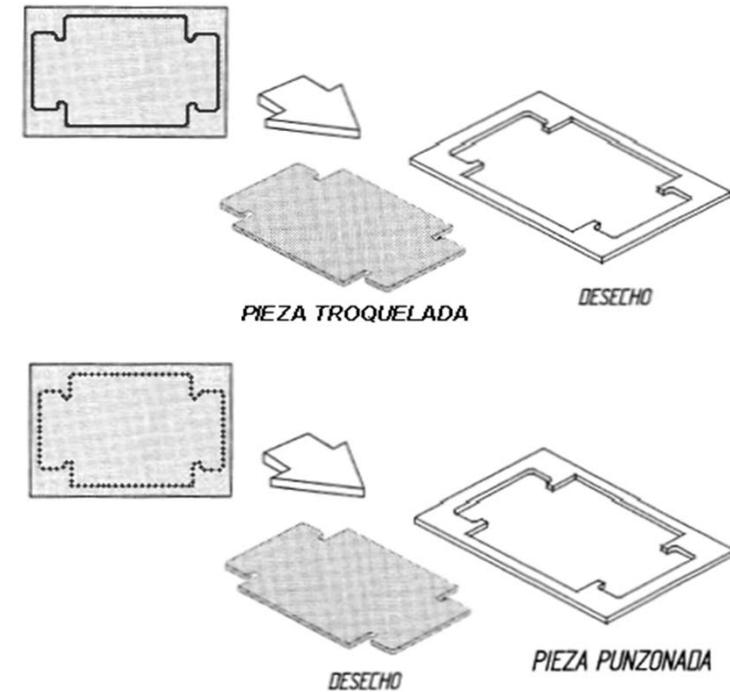
Sistemas de corte:

- Troquelado
- Punzonado



Otras operaciones de cizallado:

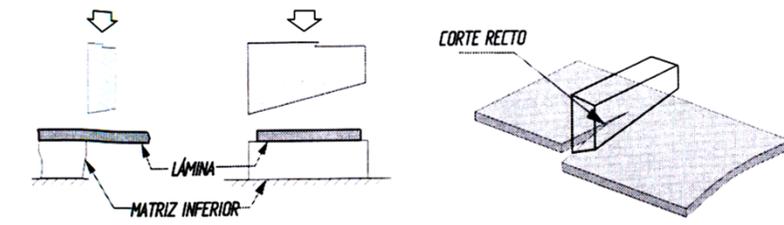
- Partido
- Perforado
- Ranurado
- Corte de muescas
- Lanceteado



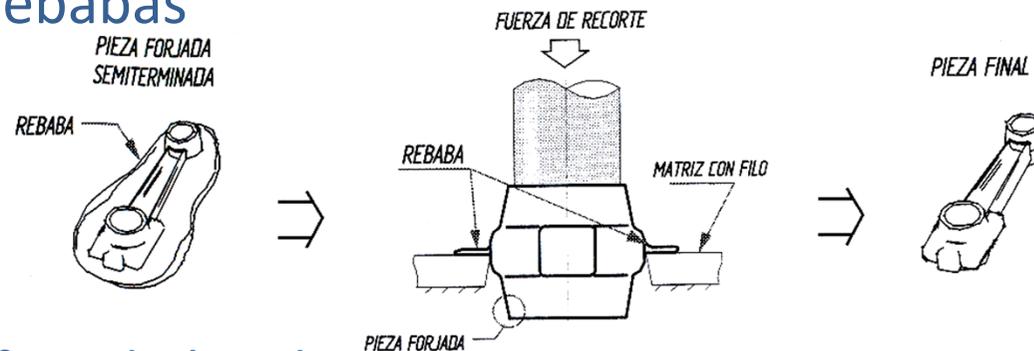
## 2. Corte: Análisis del proceso

Otras operaciones de cizallado:

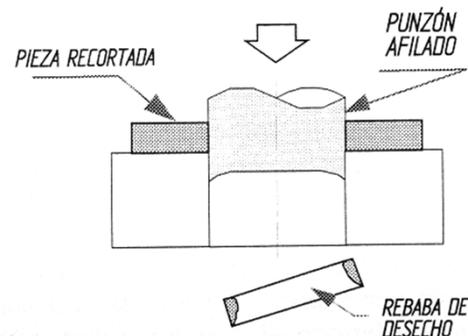
- Cizalla recta



- Recorte de rebabas



- Punzonado fino de bordes





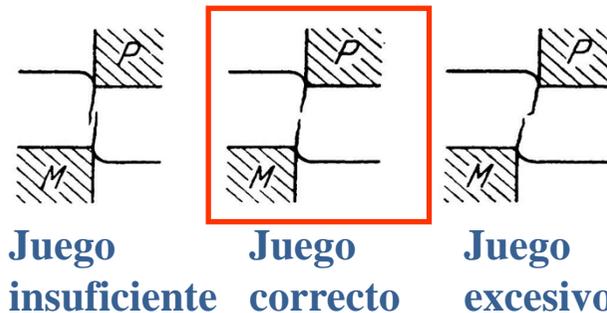
## 2. Corte: equipos y utillajes

### Holgura:

- La holgura es función de: material, temple, espesor, tamaño de preforma, proximidad a las orillas



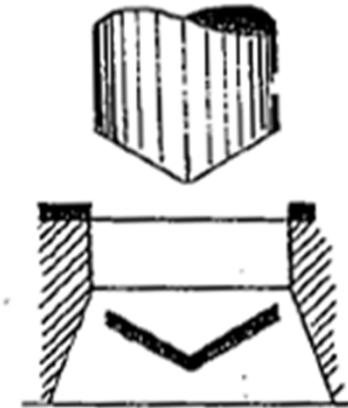
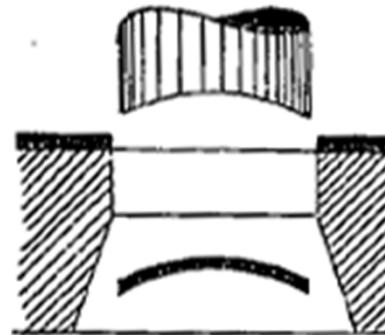
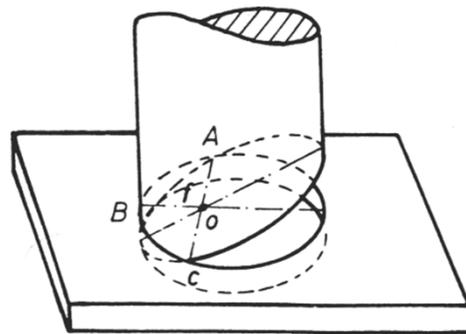
- Valores típicos entre el 2 y el 8% del espesor. (Se puede llegar al 1% alcanzando muy buenas tolerancias dimensionales  $\pm 0.05$  mm)





## 2. Corte: equipos y utillajes

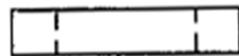
### Forma del punzón



Ángulo de corte

Espesor de la lámina bruta

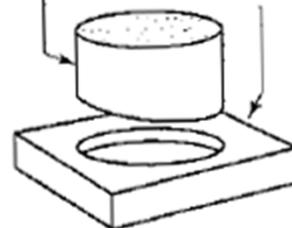
Punzón



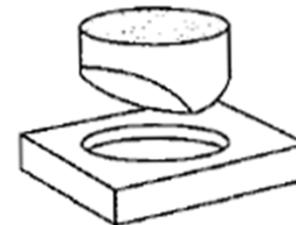
Matriz

Punzón

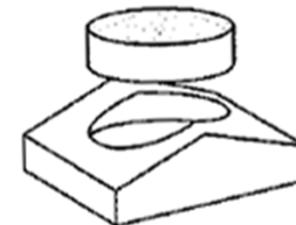
Matriz



Corte con bisel



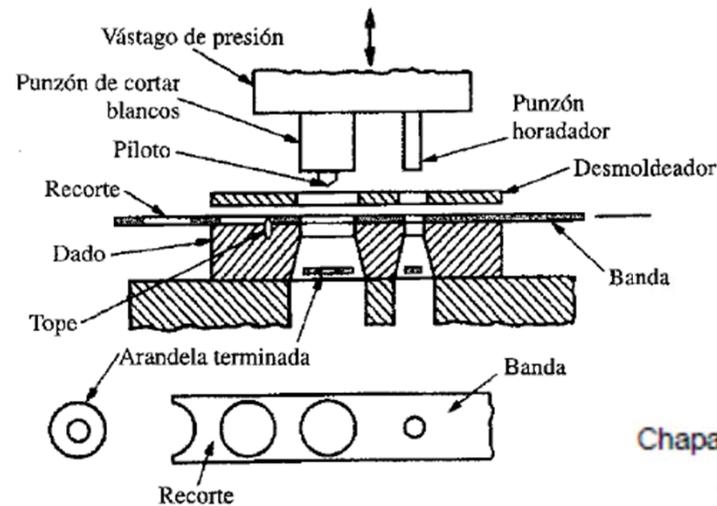
Corte con doble bisel



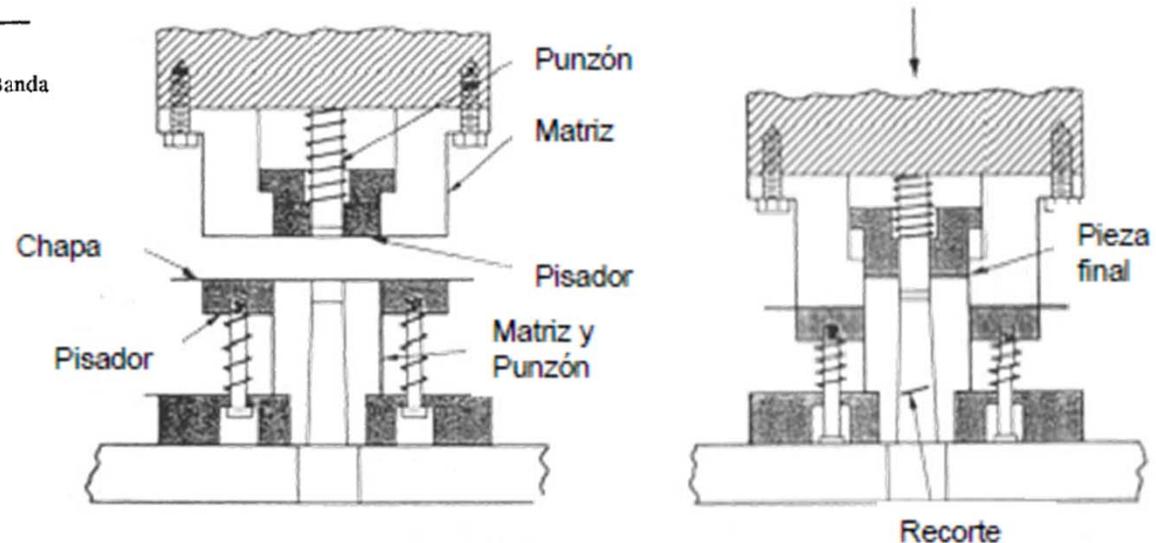
Corte convexo



## 2. Corte: equipos y utillajes



- Matrices progresivas
- Matrices compuestas



### Otros procesos de corte:

- Sierra de cinta
- Sierra alternativa
- Sierra de disco (dientes o fricción)
- Corte con gas (Oxicorte, soplete, ...)
- Corte eléctrico (Electrodo, plasma, ...)
- Corte láser
- Corte con chorro de agua a presión



# Índice de los procesos de deformación parcial

## 1. Fundamentos de deformación de lámina metálica

### 2. Corte

- 2.1. Descripción del proceso
- 2.2. Análisis del proceso
- 2.3. Equipos y utillajes

### 3. Embutición

- 3.1. Descripción del proceso
- 3.2. Análisis del proceso
- 3.3. Defectos
- 3.4. Equipos y utillajes
- 3.5. Ejemplo

### 4. Plegado

- 4.1. Descripción del proceso
- 4.2. Análisis del proceso
- 4.3. Defectos
- 4.4. Curvado de tubos
- 4.5. Equipos y utillajes

### 5. Otras operaciones de deformación de lámina metálica

- 5.1. Procesos de deformación con hule
- 5.2. Rechazado o entallado

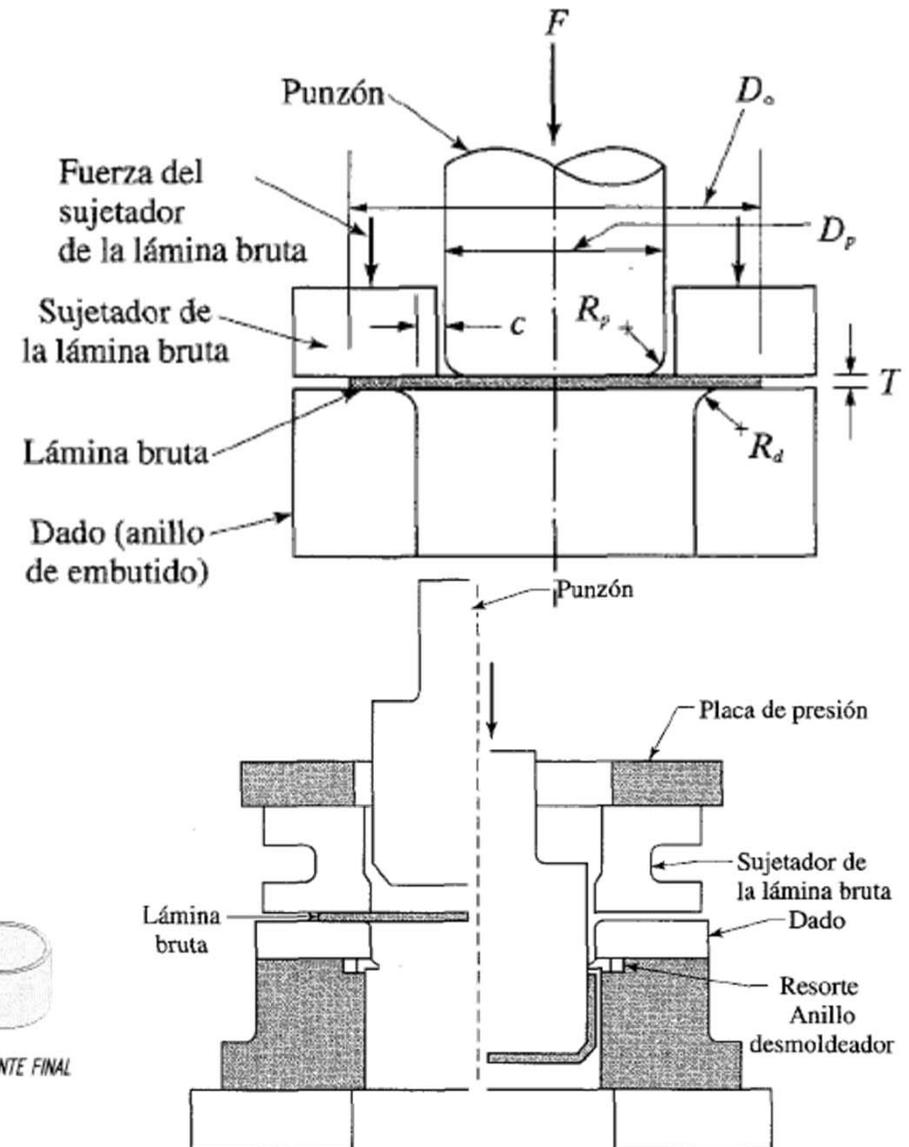
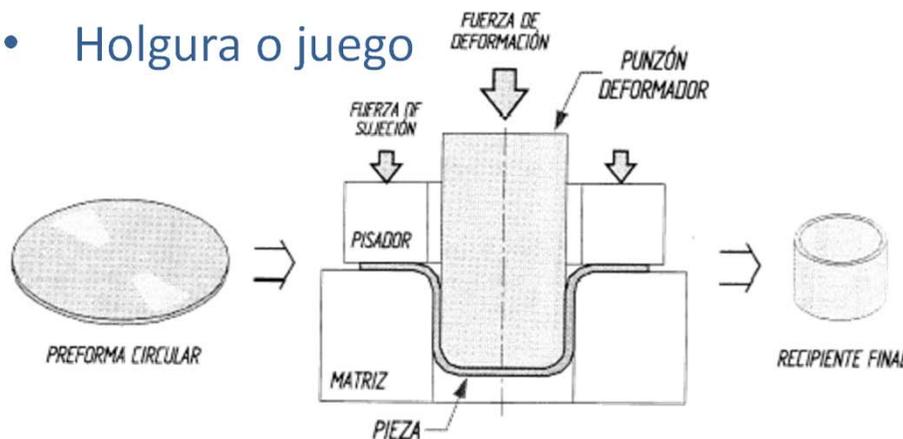
### 3. Embutición: Descripción y análisis del proceso

Formado de láminas metálicas para hacer piezas huecas, generalmente en frío

**Esfuerzo** combinado de doblado y estirado

**Proceso y Parámetros** de embutición:

- Fuerza de empuje
- Fuerza de sujeción
- Lubricación
- Holgura o juego





### 3. Embutición: Análisis del proceso

Factor de Reducción o Relación Límite de Embutido:

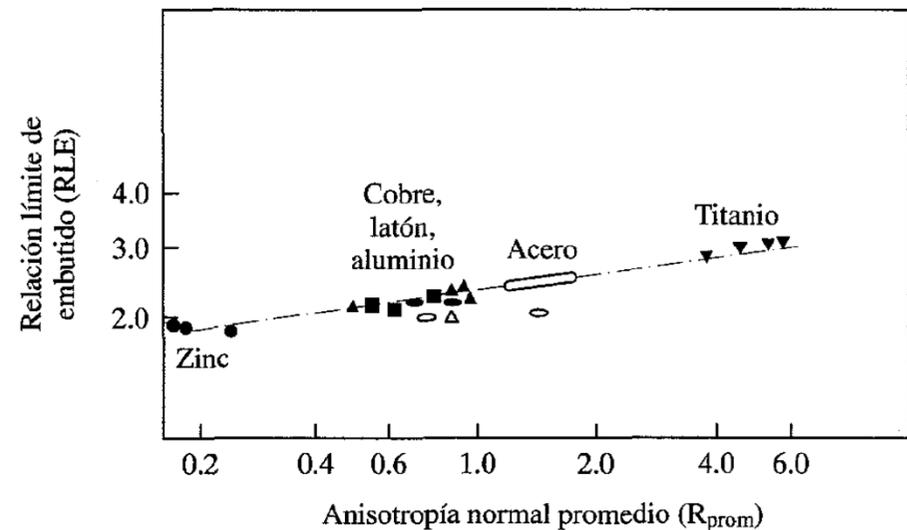
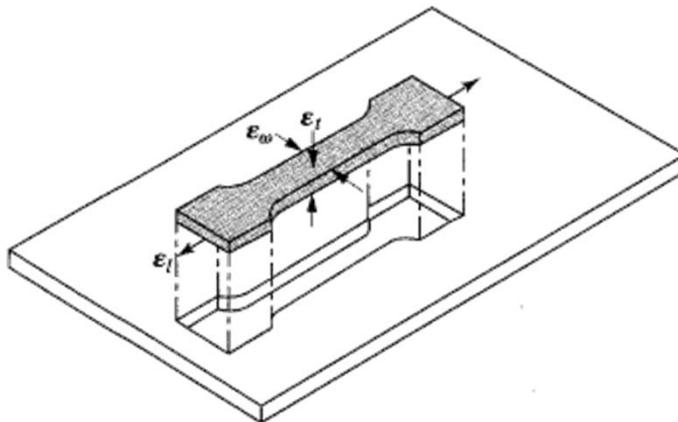
$$RLE = \frac{\text{Diámetro inicial de la lamina en bruto}}{\text{Diámetro del punzón}}$$

Anisotropía normal

$$R_{\text{prom}} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \rightarrow \left( \begin{array}{c} \text{Anisotropía normal} \\ \text{promedio} \end{array} \right)$$

R depende de la orientación con respecto a la dirección de laminado de la lámina

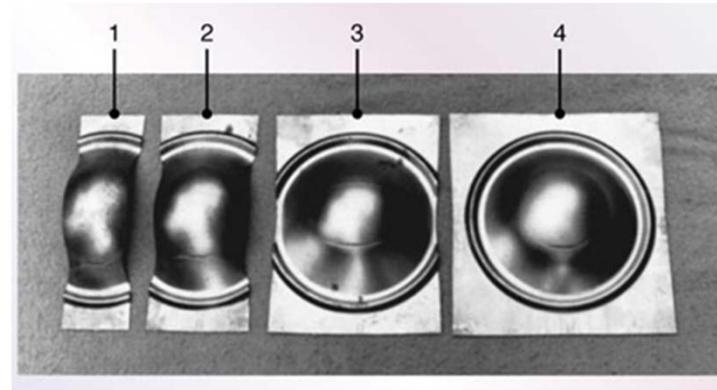
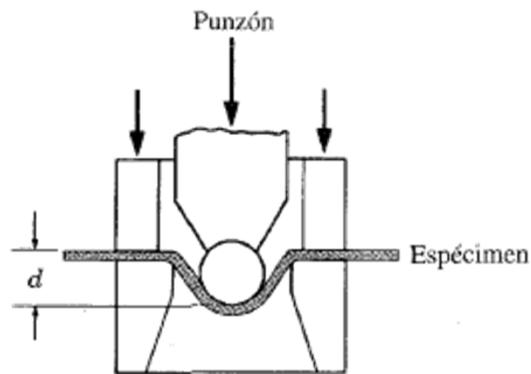
$$R_n = \frac{\text{Deformación en ancho}}{\text{Deformación en espesor}} = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t}$$



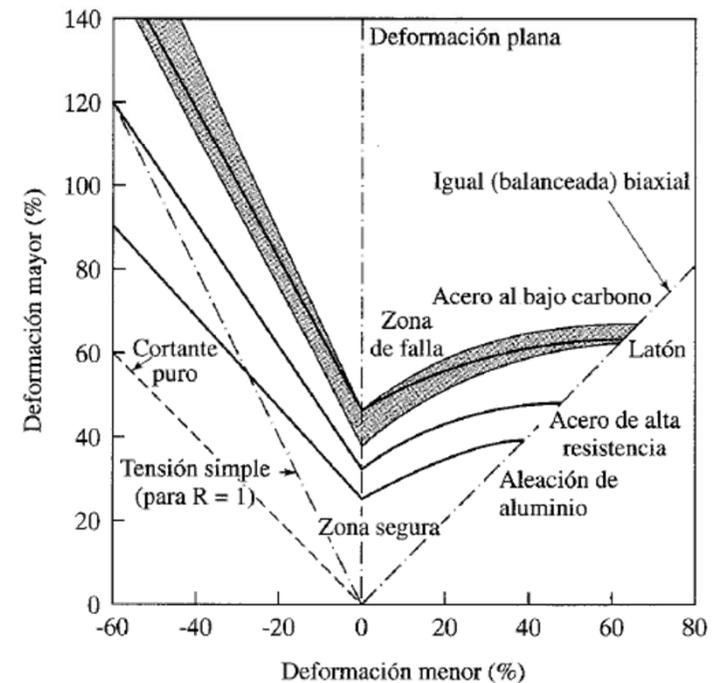
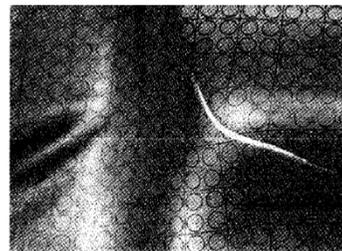
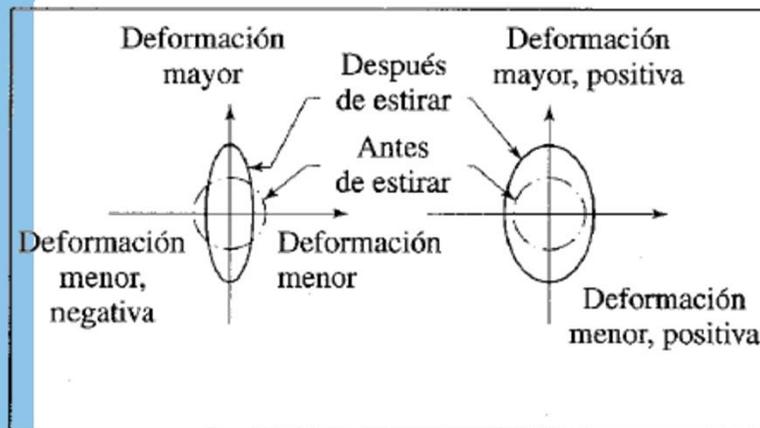


### 3. Embutición: Análisis del proceso

Ensayo de embutición Erichsen



Análisis del comportamiento: MEF (FEM), DLF (FLD)





## 3. Embutición: Análisis del proceso

### Otras operaciones:

- **Reembutado**, la forma final se consigue haciendo piezas intermedias con diámetros cada vez menores (si  $RLE > 2$ )
- **Planchado**, permite realizar piezas de espesor uniforme, corrige el efecto de la embutición con holgura elevada.
- **Embutición sin pisador**, para planchas gruesas o piezas finales no muy profundas

$$D_o - D_p < 5 e$$

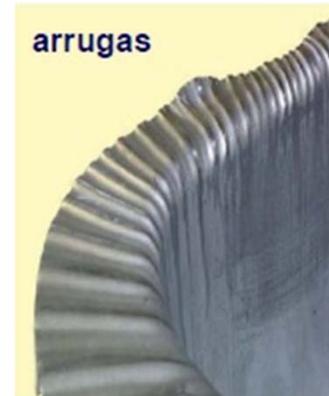
- **Embutición de piezas no cilíndricas**, formas irregulares en varias etapas de embutición



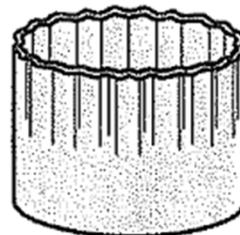
### 3. Embutición: Defectos

#### Defectos en la embutición:

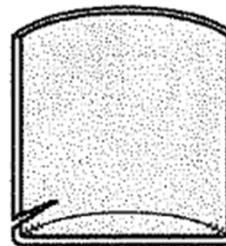
- Arrugamientos o pliegues
- Desgarros
- Rayado superficial
- Formación de orejas
- Fruncido



(a)



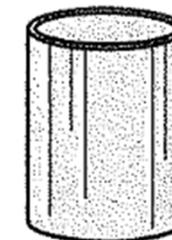
(b)



(c)



(d)



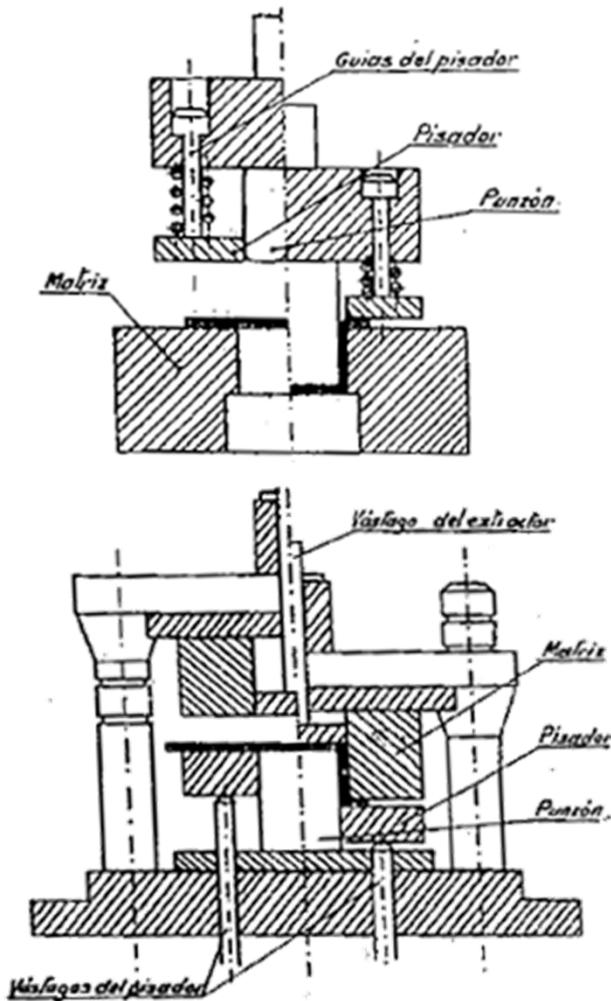
(e)



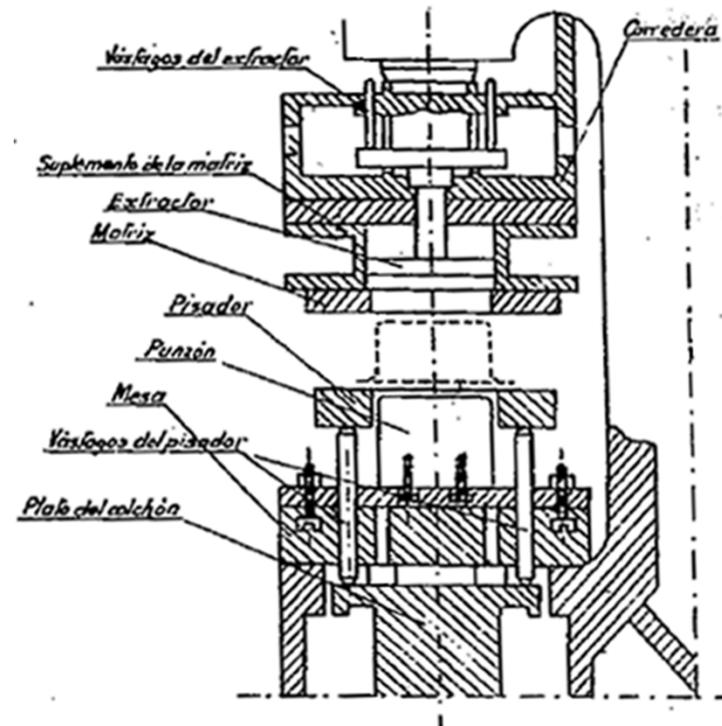
### 3. Embutición: Equipos y utillajes

Equipos:

Prensa mecánica

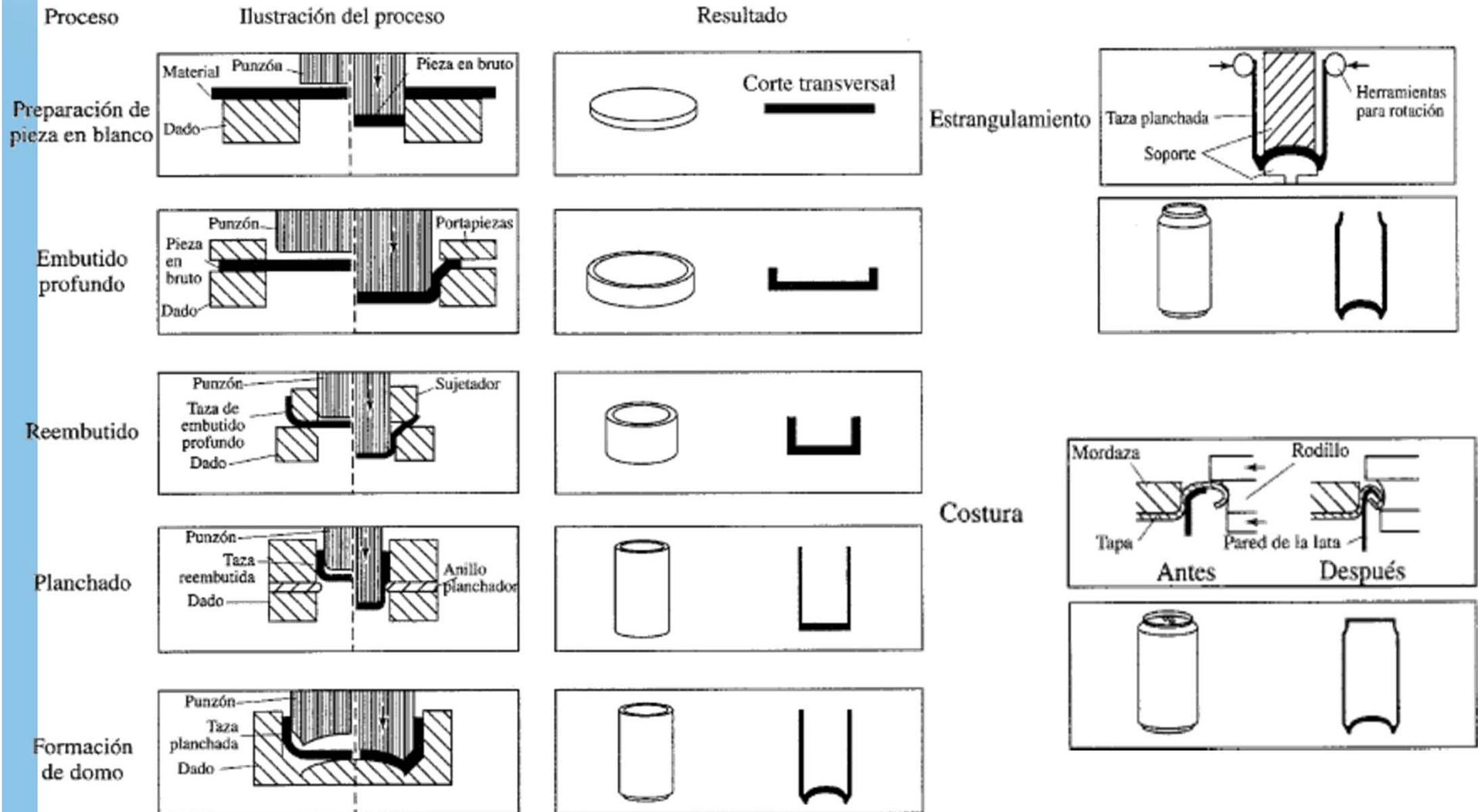


Prensa de doble acción





### 3. Embutición: Fabricación de latas





# Índice de los procesos de deformación parcial

## 1. Fundamentos de deformación de lámina metálica

### 2. Corte

- 2.1. Descripción del proceso
- 2.2. Análisis del proceso
- 2.3. Equipos y utillajes

### 3. Embutición

- 3.1. Descripción del proceso
- 3.2. Análisis del proceso
- 3.3. Defectos
- 3.4. Equipos y utillajes
- 3.5. Ejemplo

### 4. Plegado

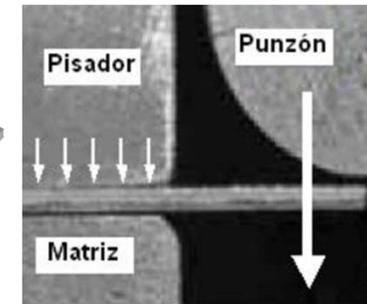
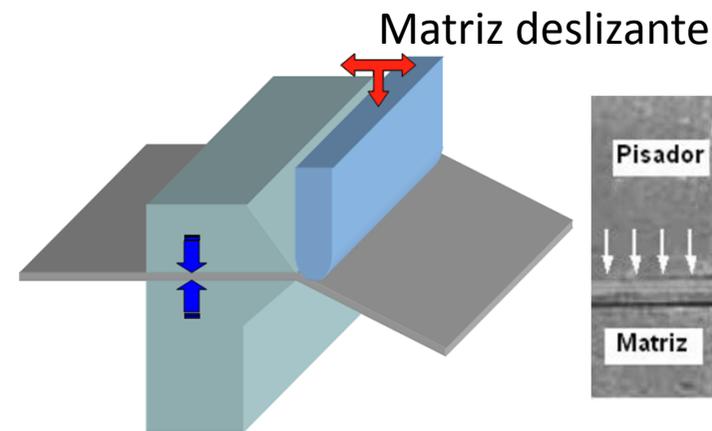
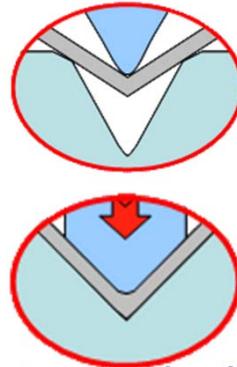
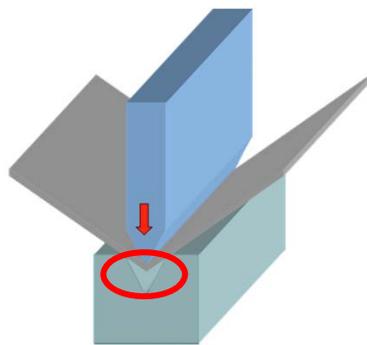
- 4.1. Descripción del proceso
- 4.2. Análisis del proceso
- 4.3. Defectos
- 4.4. Curvado de tubos
- 4.5. Equipos y utillajes

### 5. Otras operaciones de deformación de lámina metálica

- 5.1. Procesos de deformación con hule
- 5.2. Rechazado o entallado

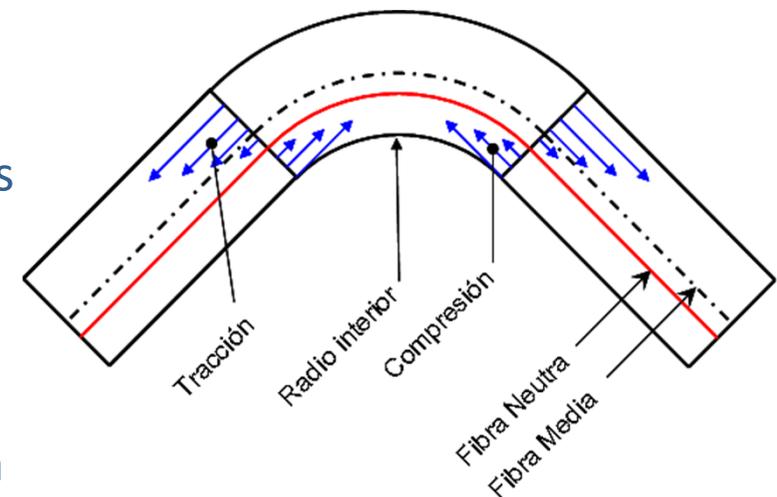
## 4. Plegado: Descripción y análisis del proceso

Proceso de deformación, realizado normalmente en **frío**, mediante el cual se realizan pliegues rectos sobre la pieza mediante la utilización de una **matriz** y un **punzón** en una prensa



Estado tensional tras el plegado:

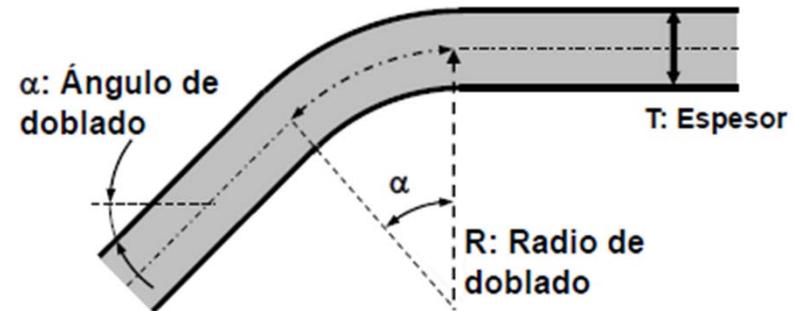
- Fibra neutra: Sección longitudinal sin deformación
- Fibra media: Sección equidistante a ambas caras
- Entre fibra neutra y cara interior: Compresión
- Entre fibra neutra y cara exterior: Tracción



## 4. Plegado: Análisis del proceso

### Parámetros importantes:

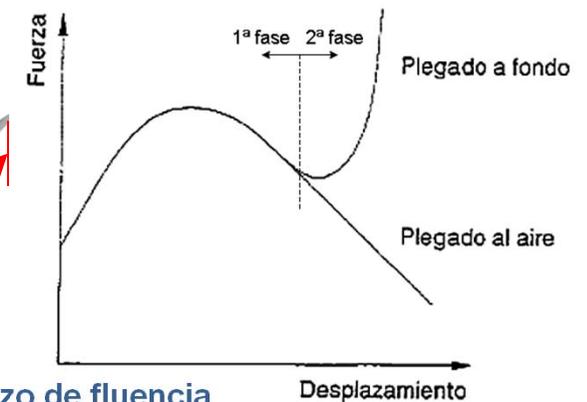
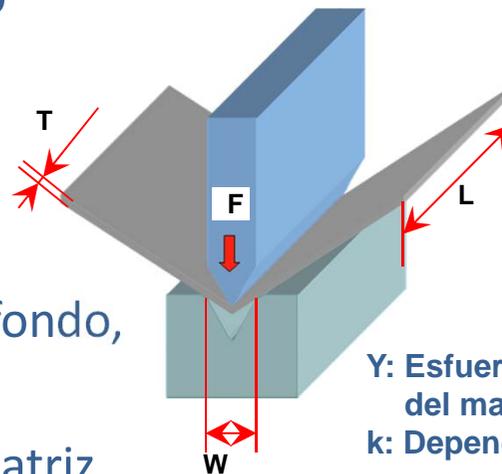
- Espesor de la chapa.
- Ángulo de doblado.
- Radio de doblado.



### Fuerza máxima de plegado

Depende de:

- Material
- Geometría de la pieza
- Tipo de proceso (al aire, a fondo, lubricación...)
- Anchura de la boca de la matriz



$Y$ : Esfuerzo de fluencia del material

$k$ : Depende del tipo de operación de plegado

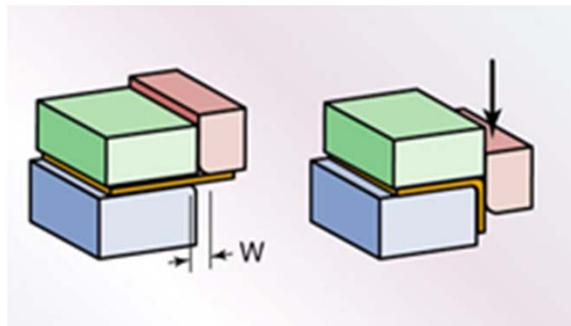
→ Doblado:  $k=0.3$

Plegado en V:  $k=1.3$

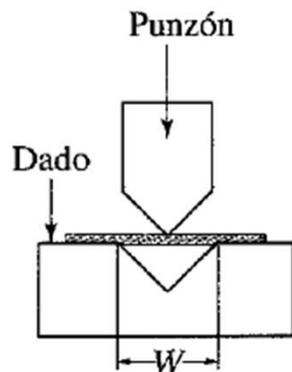
$$F = \frac{k \cdot Y \cdot L \cdot T^2}{W}$$



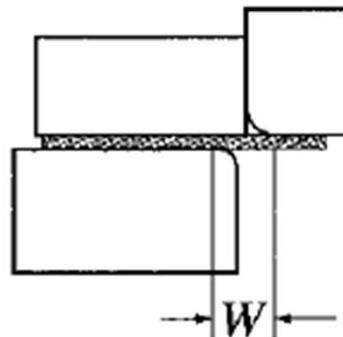
Se realiza un plegado en “U” ( $K=0.7$ ) en una chapa de latón de 2mm de espesor (resistencia a la rotura de 300 MPa, resistencia a la fluencia de 200 MPa). Calcule la fuerza de doblado para cada paso, si la longitud de la pieza es de 1500 mm. El radio de acuerdo de la matriz y del punzón es de 5mm.



Matriz en V



Matriz en U y deslizante



$$P = \frac{kYLT^2}{W}$$

where

$k = 0.3$  for wiping die,

$k = 0.7$  for a U - die,

$k = 1.3$  for a V - die



## 4. Plegado: Análisis del proceso

### Recuperación elástica o “springback”:

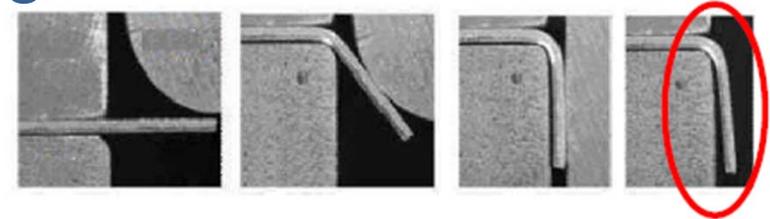
Aparece un momento recuperador debido a que la chapa trabaja en la zona elástica.

- Es difícil saberlo a priori: simulación numérica o ensayos previos.
- Soluciones:
  - sobre-flexionar la chapa.
  - trabajar en caliente.

### Radio mínimo de plegado:

Las fibras más externas trabajan a tracción y pueden superar la tensión de rotura del material. El radio mínimo depende de:

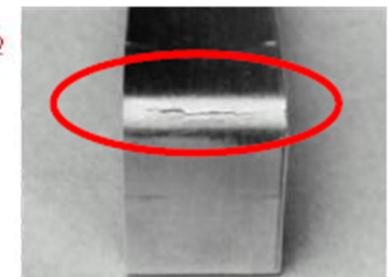
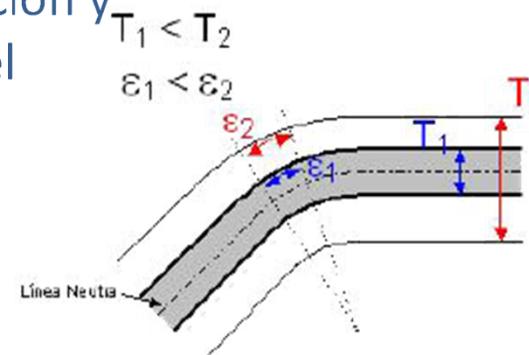
- el material de la chapa.
- su espesor.



$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \left( \frac{R_i Y}{ET} \right)^3 - 3 \left( \frac{R_i Y}{ET} \right) + 1.$$

La recuperación aumenta:

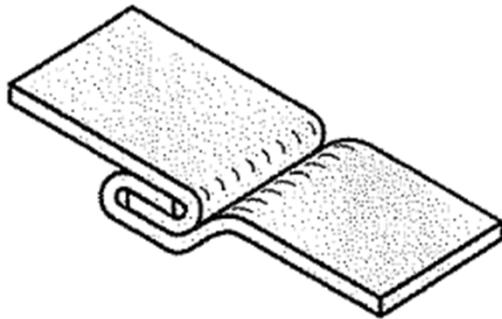
- Al incrementarse la relación R/T
- Al incrementarse el esfuerzo de fluencia (Y)
- Al disminuir el módulo elástico (E)



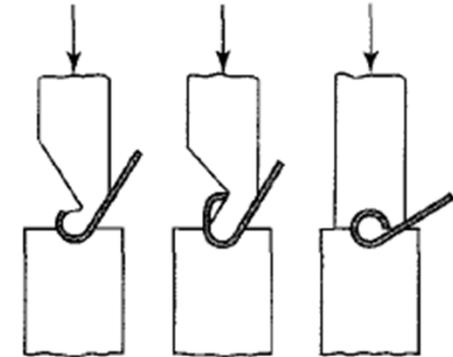
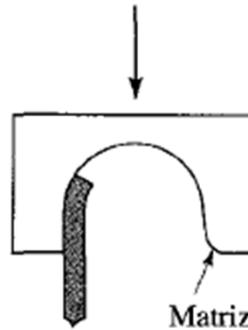


## 4. Plegado: Otras operaciones de plegado

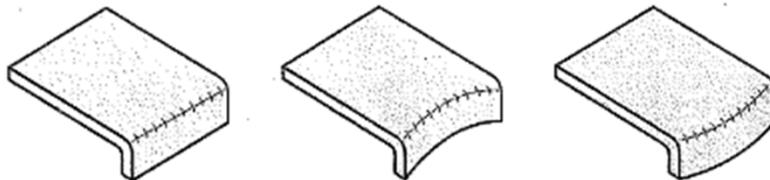
Engargolado



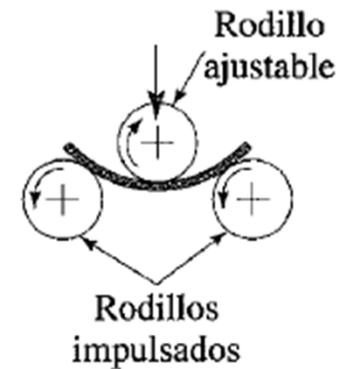
Arrollado



Rebordeado



Doblado con rodillos

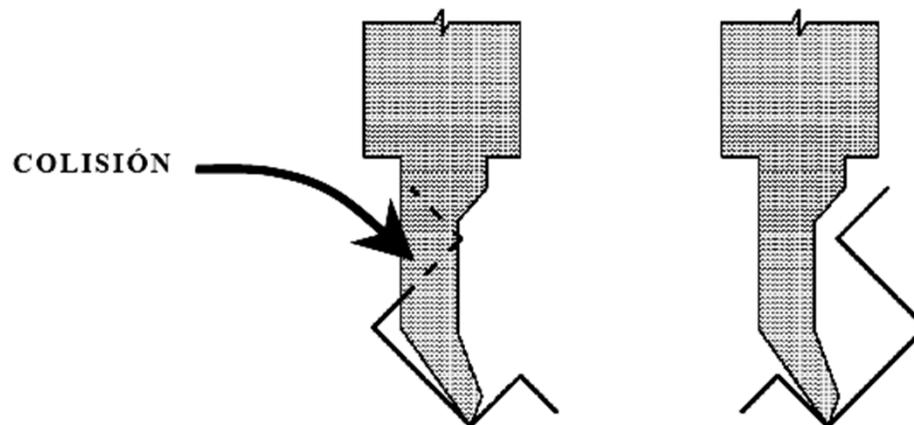




## 4. Plegado: Defectos

### Efectos en el plegado

- Endurecimiento
  - Incremento de deformación fibras exteriores e interiores
- Defectos en los bordes
  - Se deforma el borde debido a los esfuerzos de tracción y compresión en el exterior e interior respectivamente
- Colisiones
  - Analizar la secuencia de plegado para evitar colisiones



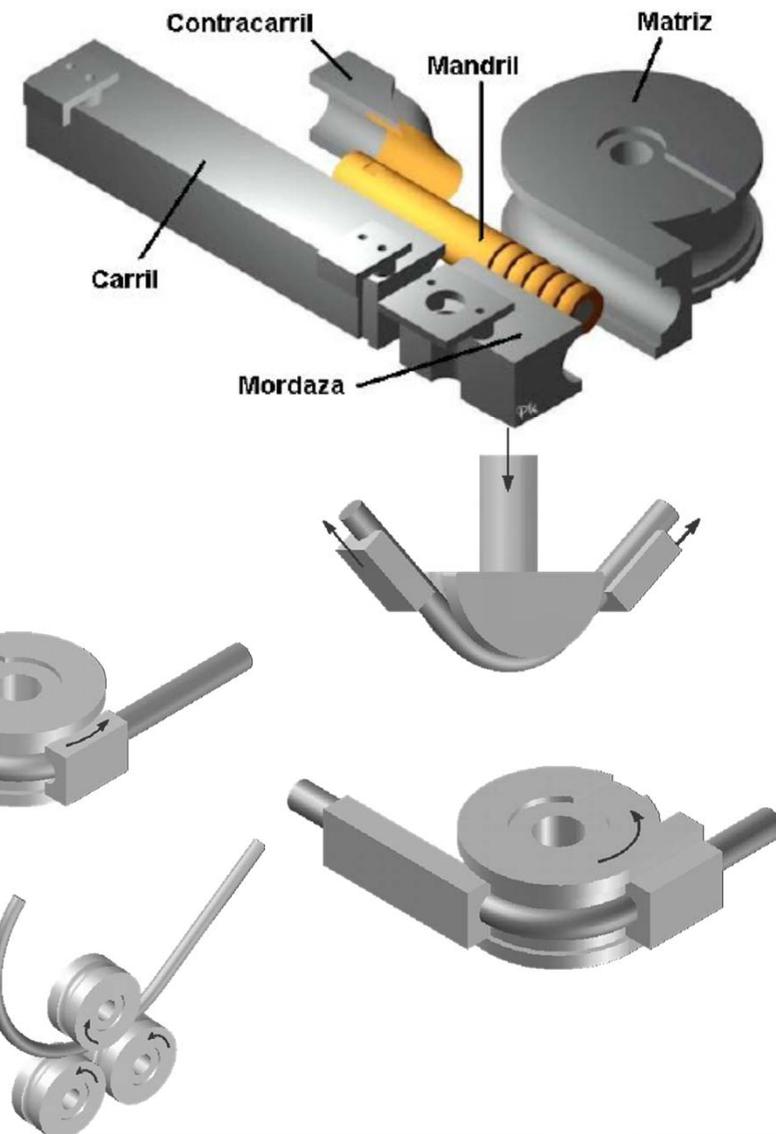


## 4. Plegado: Curvado de tubos

Proceso por el que se conforman estructuras tubulares mediante esfuerzos de plegado aplicados normalmente en frío

### Tipos de procesos de curvado

- Curvado con prensa o estiramiento
- Curvado por compresión
- Curvado con embutido o arrastre
- Curvado con rodillos





## 4. Plegado: Curvado de tubos

### Elementos del proceso de curvado

#### Mandriles

– Agua, arena (u otras partículas sueltas)

– Mandril estándar 

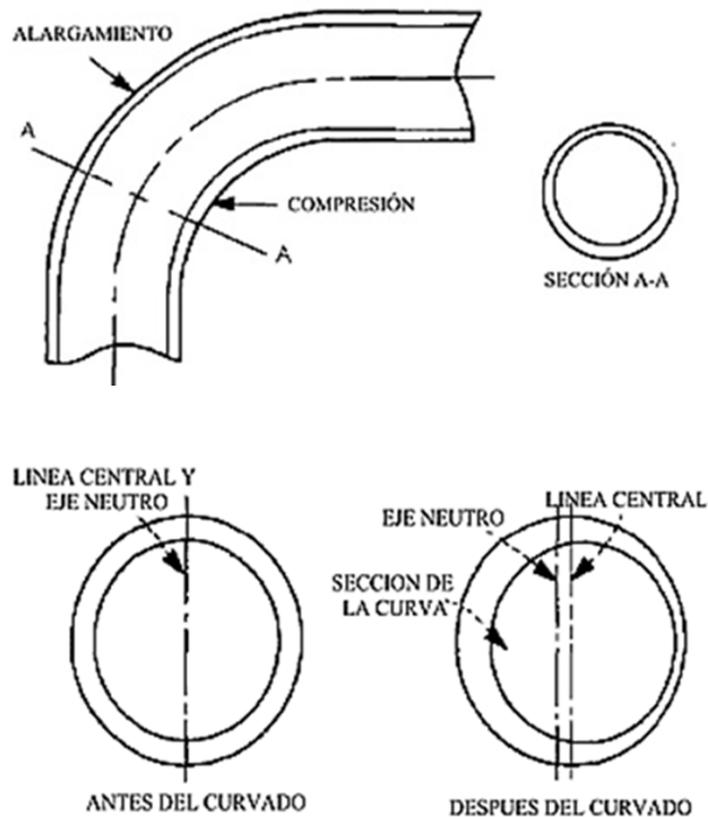
– Mandril de forma 

– Mandril de bolas 



## 4. Plegado: Curvado de tubos

Estado tensional y de  
deformación tras el curvado

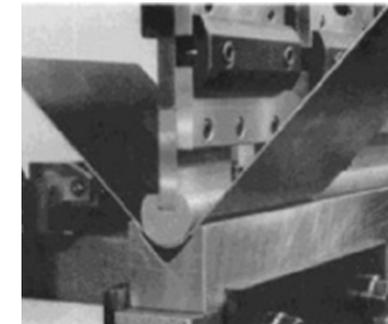
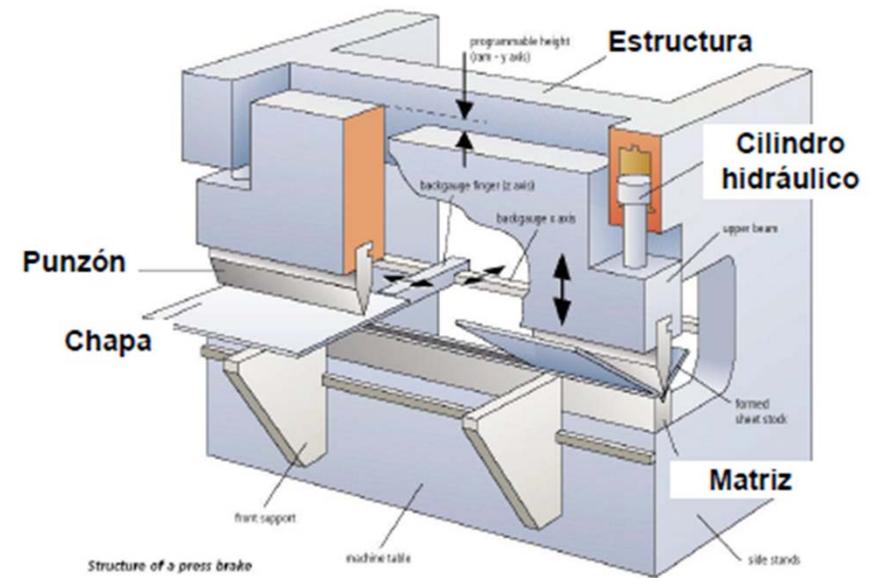
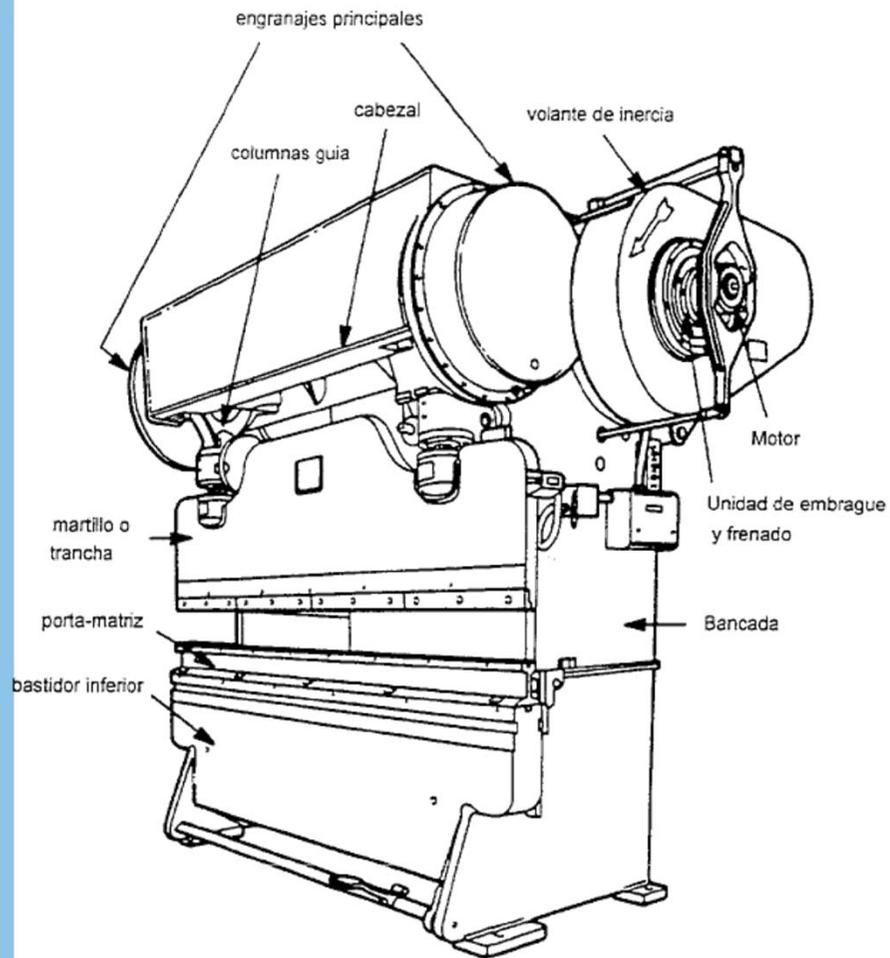


### Principales efectos en el curvado de tubos:

- Aplastamiento del exterior de la curva
- Arrugas en el interior de la curva
- Reducción crítica del espesor exterior del tubo
- Recuperación elástica tras el plegado
- Modificación de la longitud del tubo



## 4. Plegado: Equipo





# Índice de los procesos de deformación parcial

## 1. Fundamentos de deformación de lámina metálica

### 2. Corte

- 2.1. Descripción del proceso
- 2.2. Análisis del proceso
- 2.3. Equipos y utillajes

### 3. Embutición

- 3.1. Descripción del proceso
- 3.2. Análisis del proceso
- 3.3. Defectos
- 3.4. Equipos y utillajes
- 3.5. Ejemplo

### 4. Plegado

- 4.1. Descripción del proceso
- 4.2. Análisis del proceso
- 4.3. Defectos
- 4.4. Curvado de tubos
- 4.5. Equipos y utillajes

### 5. Otras operaciones de deformación de lámina metálica

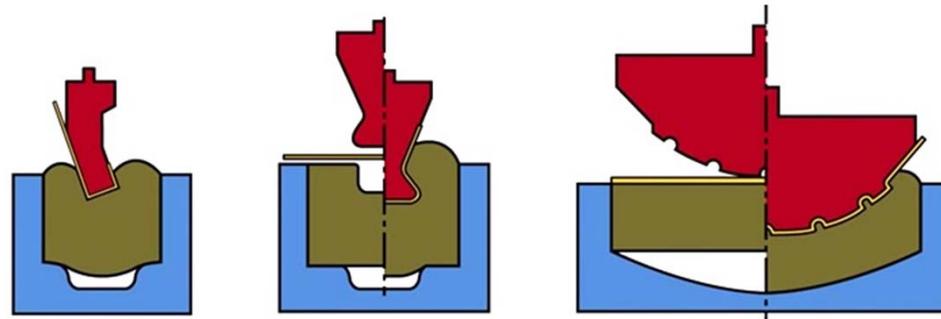
- 5.1. Procesos de deformación con hule
- 5.2. Rechazado o entallado

## 5. Formado con hule

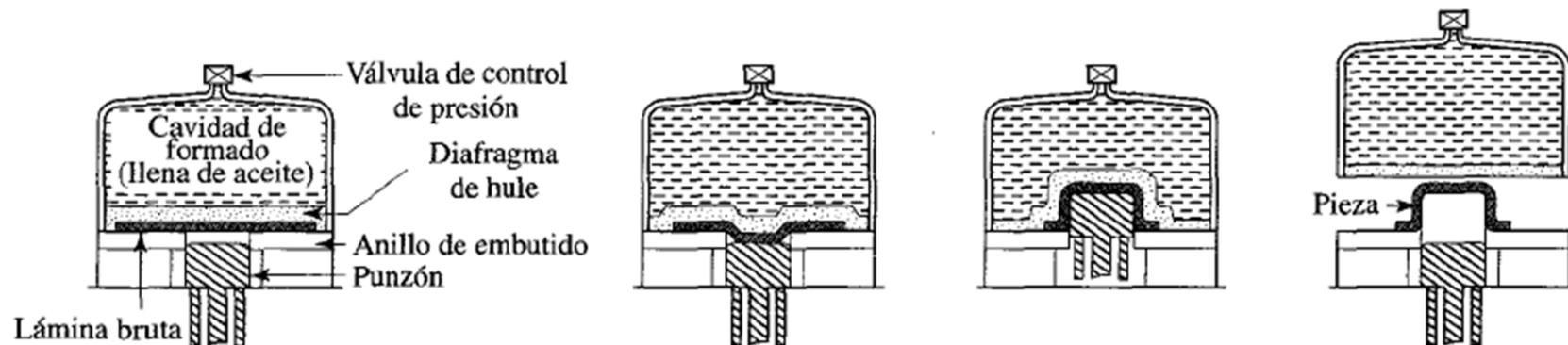
La matriz móvil es de material flexible

Normalmente la matriz es de poliuretano

- Normal (<10Mpa)

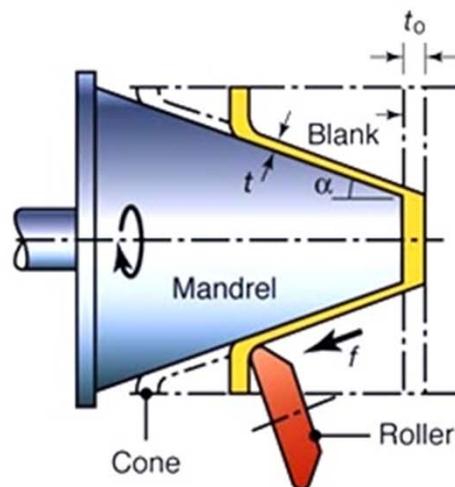
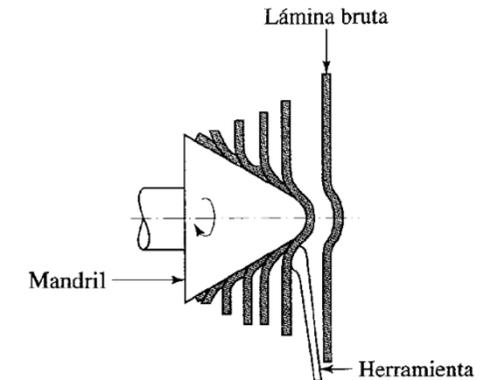


- Hidroconformado (<100Mpa)

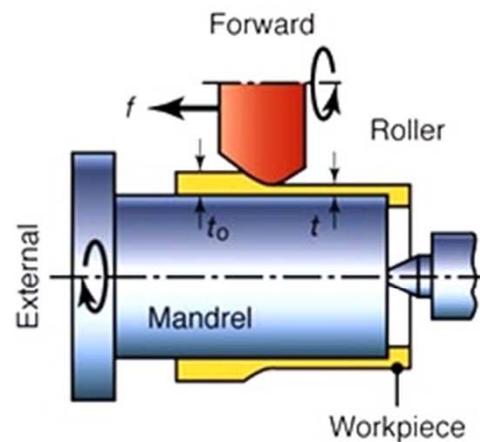


## 5. Rechazado o Entallado

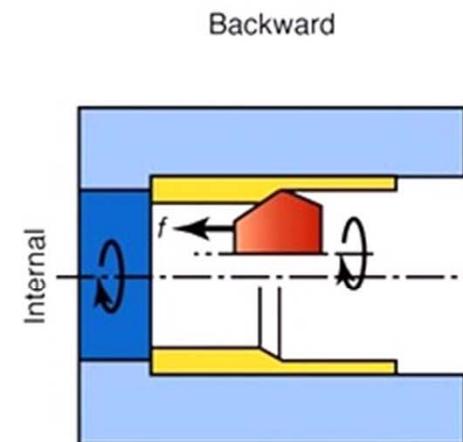
- Conformado para piezas de revolución
- La lámina se aprisiona entre un molde con la forma elegida y un pisador



(a)



(b)



(c)



## Resumen de los procesos de deformación de lámina metálica

Proceso	Características
Formado por laminación	Piezas largas con perfiles transversales complicados; buen acabado superficial; grandes tasas de producción; altos costos de herramientas.
Formado por extensión	Piezas grandes con contorno superficial; adecuado para pequeñas producciones; altos costos de mano de obra; los costos de herramientas y equipo dependen del tamaño de la pieza.
Embutido	Piezas superficiales o profundas con formas relativamente simples; grandes producciones; altos costos de herramientas y equipo.
Estampado	Incluye una diversidad de operaciones, como punzonado, recorte de piezas en blanco, realzado, doblado bridado y acuñado; formas simples o complicadas, con grandes producciones; los costos de herramientas y equipo pueden ser altos, pero los costos de mano de obra son bajos.
Formado con hule	Embutido y realzado de formas simples o complicadas; la superficie de la lámina se protege con membranas de hule; flexibilidad de operación; bajos costos de herramientas.
Rechazado	Piezas grandes o pequeñas, con simetría axial (axisimetría); buen acabado superficial; bajos costos de herramienta, pero los costos de mano de obra pueden ser altos, a menos que se automaticen las operaciones.
Formado superplástico	Formas complicadas, gran detalle y tolerancias estrechas; los tiempos de formación son largos y por ello la rapidez de producción es baja. Piezas no adecuadas para uso en alta temperatura.
Repujado	Contornos superficiales en láminas grandes; flexibilidad de operación; los costos de equipo pueden ser altos; el proceso también se usa para enderezar piezas.
Formado por explosión	Láminas muy grandes con formas relativamente complicadas, aunque por lo general axisimétricas; bajos costos de herramienta, pero altos costos de mano de obra; adecuado para pequeñas producciones; grandes tiempos de ciclo.
Formado por impulso magnético	Operaciones de formado superficial, abombado y realzado con láminas de resistencia relativamente baja; muy adecuado para formas tubulares; grandes tasas de producción; requiere herramientas especiales.