

Tecnología Mecánica

Unidad N° 4

Procesos de mecanizado sin arranque de virutas (formado de metales)

3 - Procesos de deformación volumétrica

Roberto Driussi/Martín Alarcón/Fernando Nadalich



27 de septiembre de 2024

Índice

1 Introducción

2 Laminación plana

- Conceptos y teoría del laminado
- Fuerza de laminado, Torque y Potencia
- Configuración de los trenes de laminación

3 Laminación de formas

- Ejemplos de laminación de formas

4 Forjado

- Conceptos generales
- Algunos ejemplos

5 Extrusión

- Introducción y Fuerza de extrusión
- Extrusión en caliente
- Extrusión en frío
- Extrusión por impacto
- Extrusión Hidrostática
- Defectos y equipos

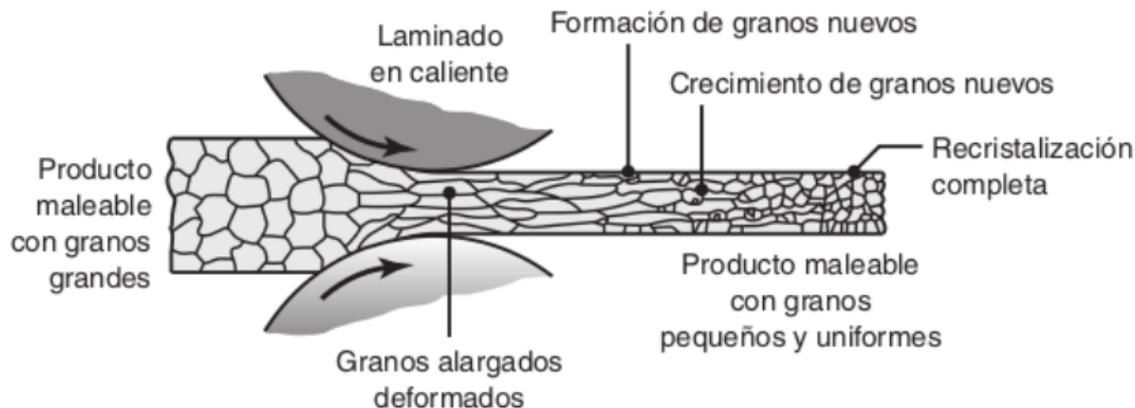
6 Proceso de estirado - Trefilado

- Fuerza de trefilado
- Diseño y práctica del trefilado

7 A leer!!!!

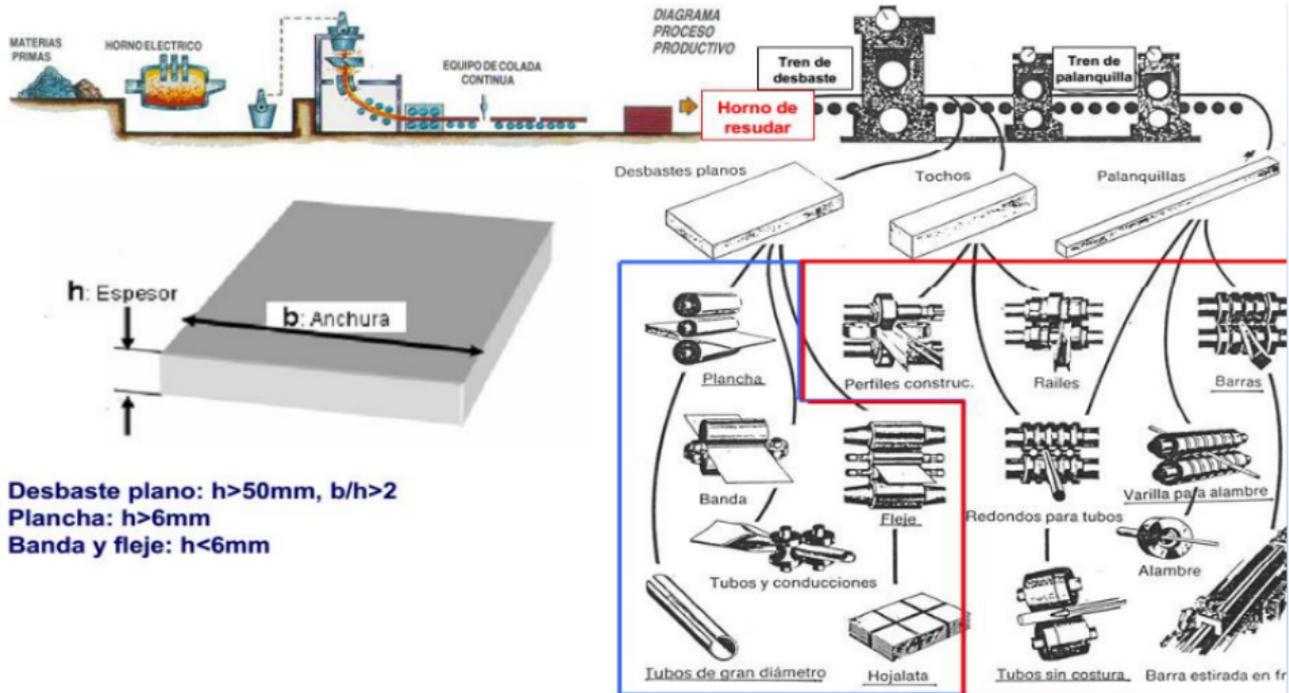
Definición

La **laminación** es el proceso que consiste en reducir el espesor o cambiar la sección transversal de una pieza de trabajo larga mediante fuerzas de compresión aplicadas con un conjunto de rodillos.



Introducción
 Laminación plana
 Laminación de formas
 Forjado
 Extrusión
 Proceso de estirado - Trefilado
 A leer!!!!

Proceso de colada continua + laminación

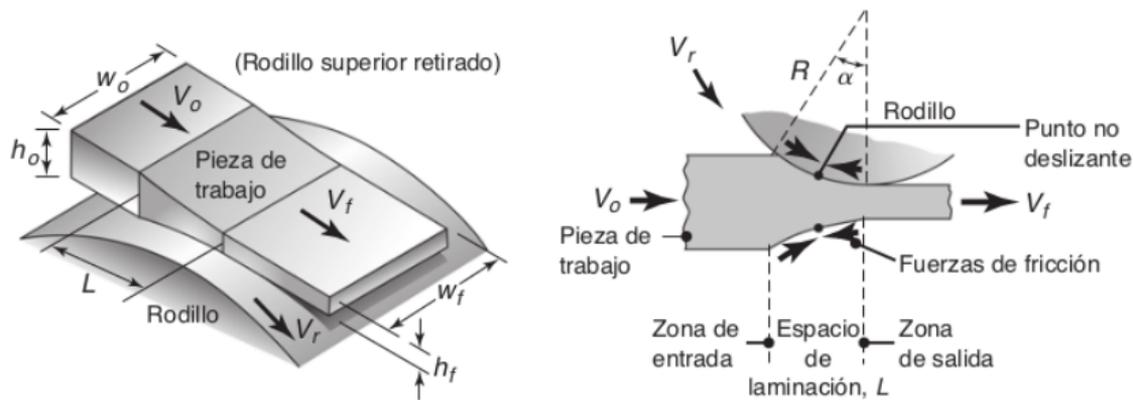


Generalidades

- **Laminación** es el primer paso en la transformación de productos metálicos.
- **Productos laminados:** (i) productos subproductos que sirven de materia prima a otros procesos y (ii) productos terminados (perfiles, hierros de construcción, tubos, etc.).
- **Grandes instalaciones**, que se amortizan mediante la producción masiva de productos normalizados.



Proceso de laminación plana



$$\rightarrow V_o < V_f \wedge V_r < V_f \wedge V_o < V_r \Rightarrow V_o < V_r < V_f$$

Proceso de laminación plana

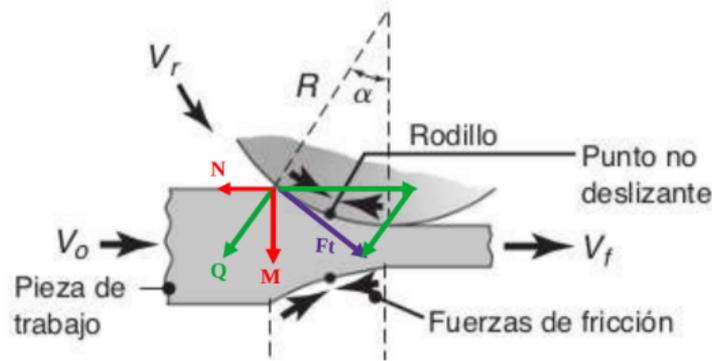
La reducción máxima posible se define como la diferencia entre los espesores inicial y final de la cinta ($h_o - h_f$). Se puede demostrar que es una función del coeficiente de fricción (μ) entre el material y el rodillo, y el radio del rodillo (R) mediante la siguiente relación:

$$h_o - h_f = \mu^2 R \quad (1)$$

Como se esperaba, cuanto más alta sea la fricción y más grande el radio del rodillo, mayor será la reducción máxima posible.

Diámetro mínimo de rodillos (para el acero dulce): $D_{min} = 13 (h_o - h_f)$

Proceso de laminación plana

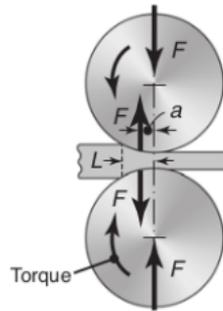


$$N = Q \sin \alpha \wedge M = Q \cos \alpha$$

Para que el material sea tomado y arrastrado se debe cumplir que: $\mu M > N \Rightarrow$

$$\mu (Q \cos \alpha) > Q \sin \alpha \Rightarrow \mu > \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

Fuerza de laminado, Torque y Potencia



→ Fuerza de laminado: $F = L b Y_{prom}$

→ Longitud de contacto o espacio de laminación: $L = \sqrt{R (e_o - e_f)}$

→ Esfuerzo de deformación promedio: $Y_{prom} = \frac{Y_1 + Y_2}{2}$

→ Torque: $T = F \left(\frac{L}{2}\right)$

→ Potencia: $P = T w$ (w : velocidad angular de los rodillos)

Reducción de la fuerza de laminado

Las fuerzas de laminado se pueden reducir implementando algunas de las siguientes estrategias:

- 1 Reduciendo la fricción en la interfaz del rodillo y la pieza de trabajo.
- 2 Utilizando rodillos de diámetro más pequeño para reducir el área de contacto.
- 3 Aplicando reducciones menores por pase para reducir el área de contacto.
- 4 Laminando a temperaturas elevadas para reducir la resistencia del material.
- 5 Aplicando tensiones al material.

Trenes de laminación

→ Coeficiente de reducción: $\varphi = \frac{e_o}{e_f}$

→ Normalmente se adopta un coeficiente de reducción inicial de $\varphi_o = 1,6$.
Para que luego este vaya disminuyendo según una **progresión aritmética**.

1 Primer pasada: $\varphi_o = 1,6 = \frac{e_o}{e_1}$

2 Segunda pasada: $\varphi_1 = \varphi_o - \delta = \frac{e_1}{e_2}$

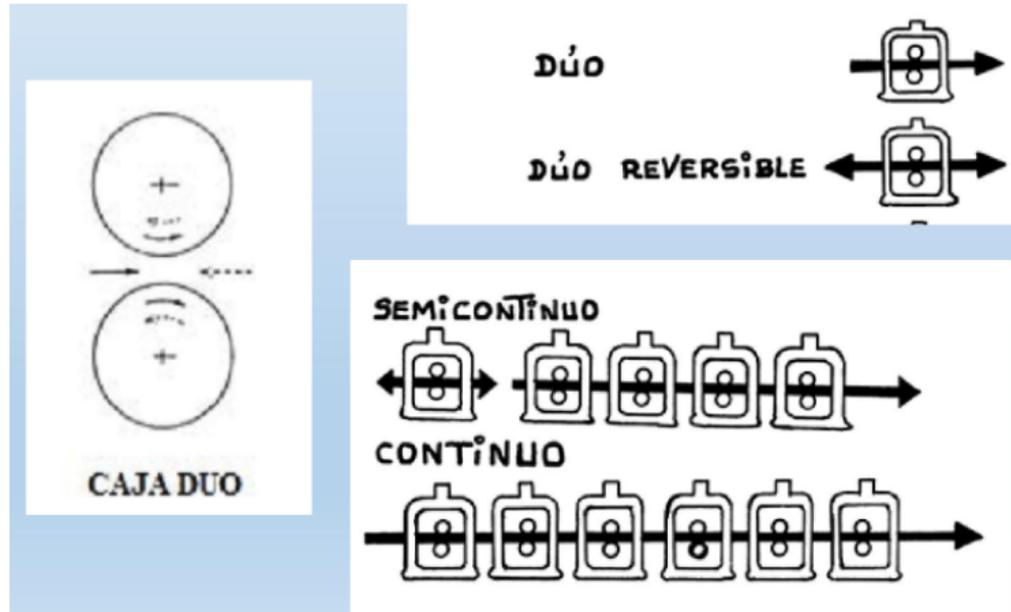
3 Tercer pasada: $\varphi_2 = \varphi_1 - \delta = \frac{e_2}{e_3}$

→ Razón de progresión aritmética: $\delta = \frac{\varphi_o - 1}{n - 1}$

→ Velocidad volumetría del material, se mantiene constante: $V_o b_o e_o = V_f b_f e_f$

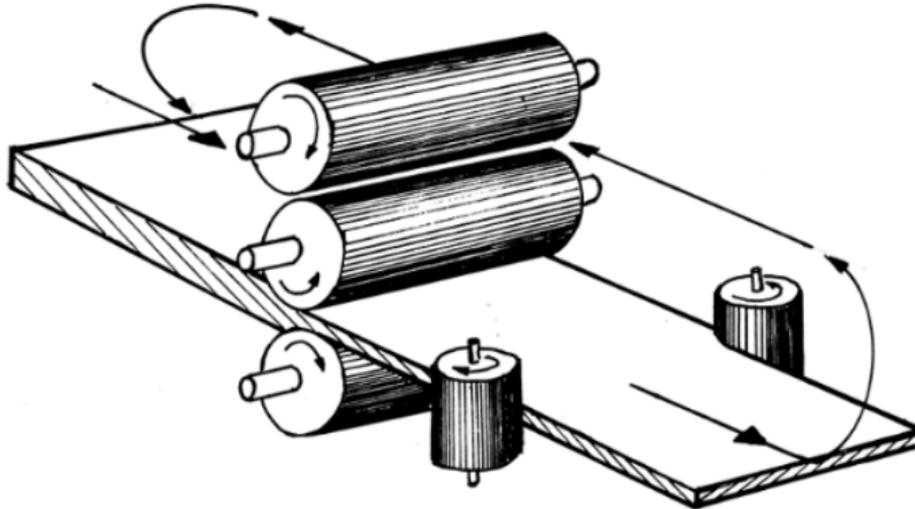
Cajas o bastidores de laminación

→ Caja dúo: dos rodillos o cilindros.

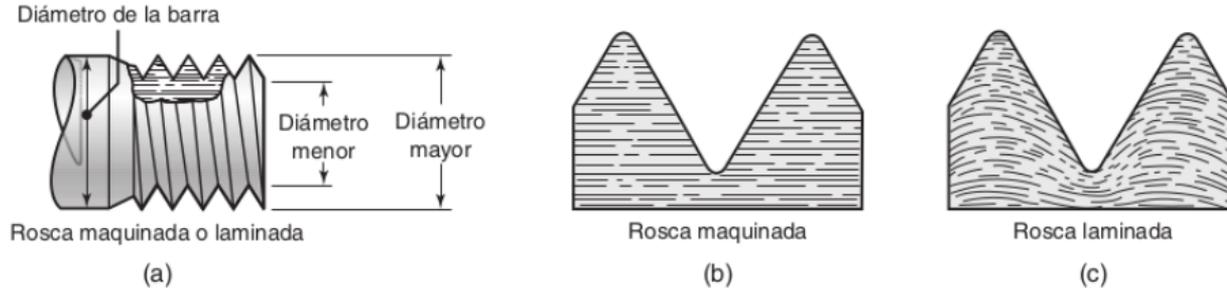


Cajas o bastidores de laminación

→ Caja trío: tres rodillos o cilindros.



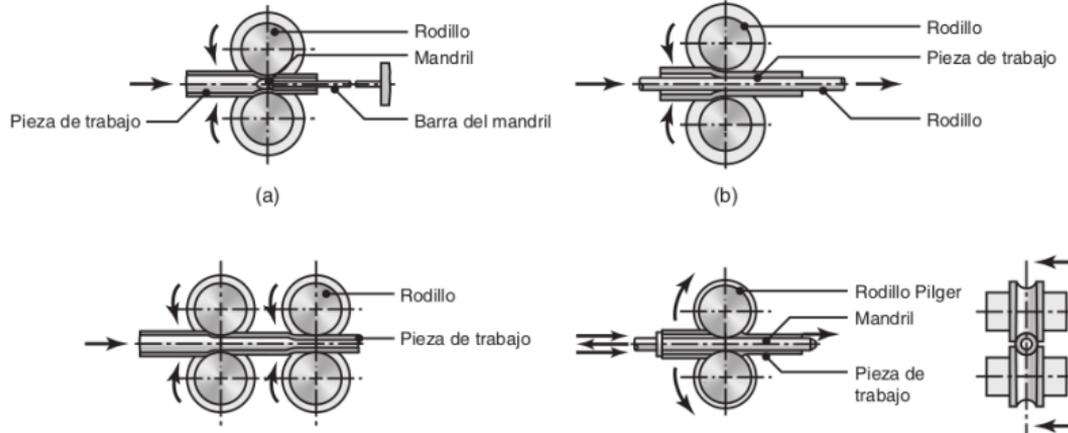
Rocas mecanizadas vs laminadas



En las roscas laminadas a diferencia de las maquinadas (la cual se corta a través de los granos del metal) se obtiene mejor resistencia debido al trabajo en frío y al flujo favorable de los granos.

Laminado de tubos

El diámetro y espesor de los tubos y la tubería se puede reducir mediante el laminado de tubos, que utiliza rodillos con forma. (a) Con mandril fijo, (b) Con mandril flotante, (c) Sin mandril y (d) Laminado Pilger con un mandril y rodillos de forma.

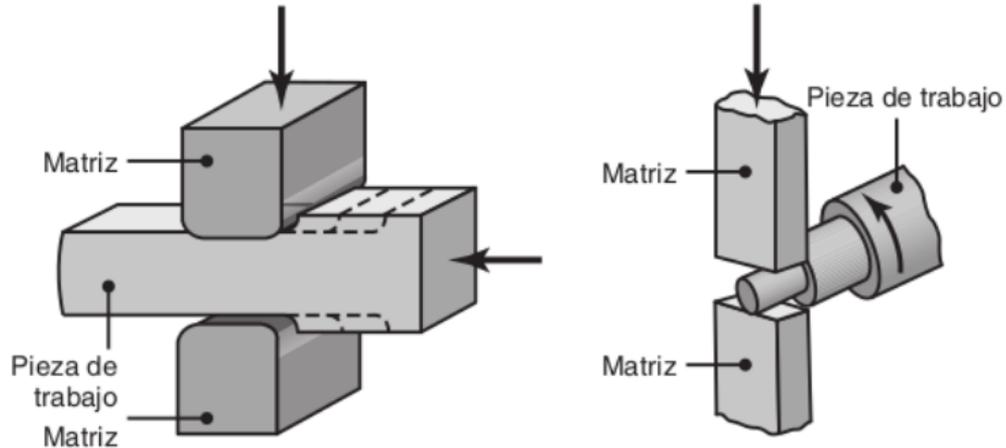


Definición

El **forjado** es un proceso básico en el que la pieza de trabajo se moldea mediante fuerzas de compresión aplicadas por medio de matrices y herramientas.



Definición



Ejemplo de pieza forjada



Pieza en bruto (barra de material)



Recalcado



Aproximación o bloqueo

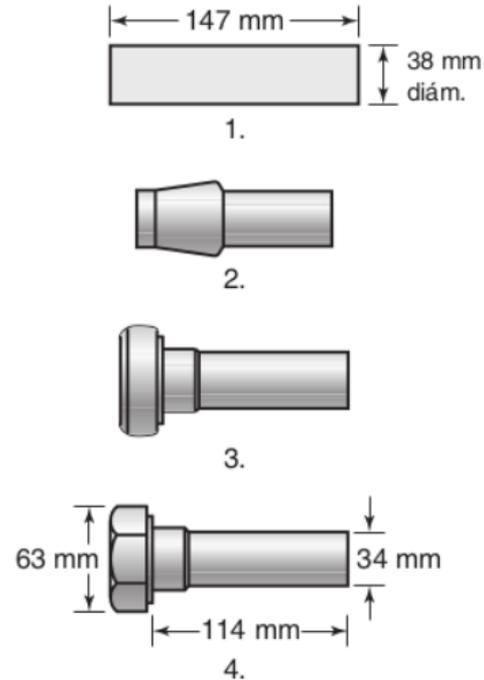
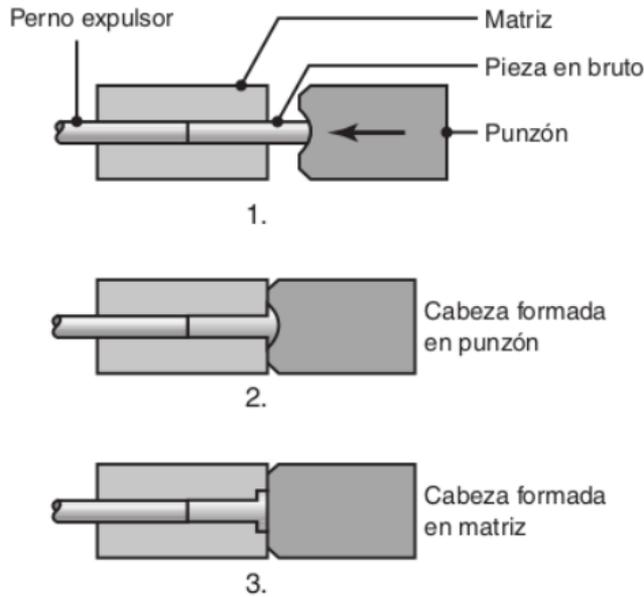


Acabado



Recorte

Ejemplo de pieza forjada



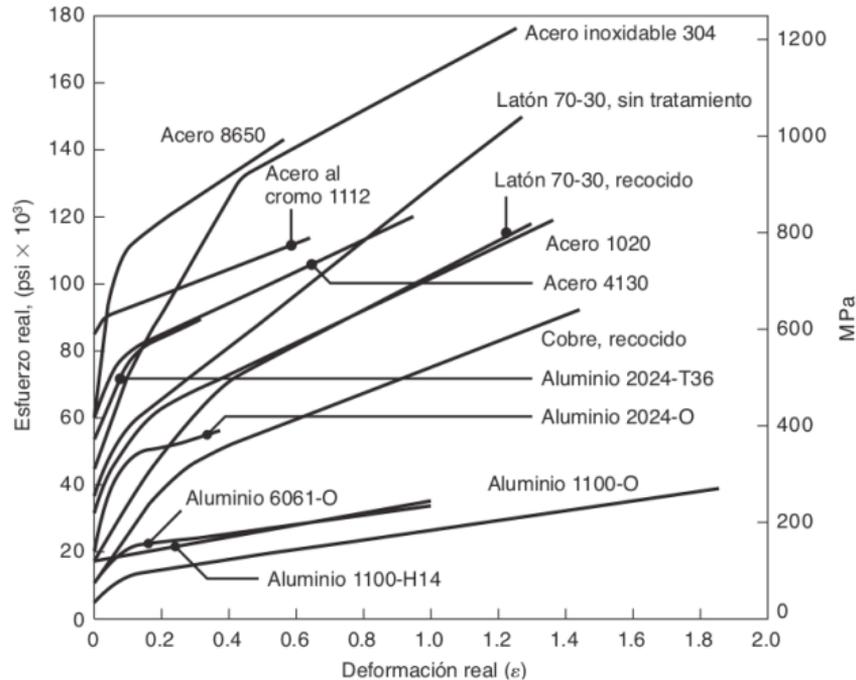
Fuerza en el forjado

La fuerza en una operación de forjado de matriz abierta, en una pieza sólida cilíndrica, se puede calcular a partir de la fórmula:

$$F = Y_F \pi r^2 \left(1 + \frac{2\mu r}{3b} \right) \quad (3)$$

en la que Y_F es el esfuerzo de flujo del material, μ el coeficiente de fricción entre la pieza de trabajo y la matriz, mientras que r y b son el radio y la altura de la pieza de trabajo (dimensiones finales de la zona forjada).

Gráficos de esfuerzos-deformación



Algunos ejemplos

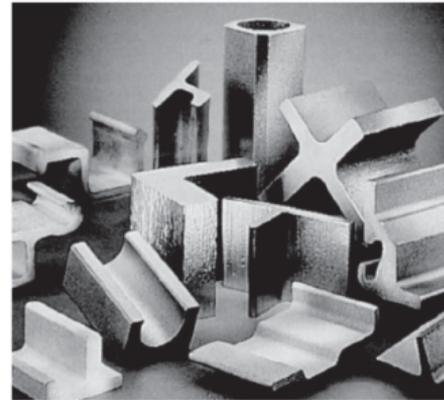
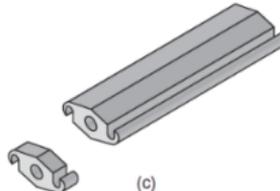
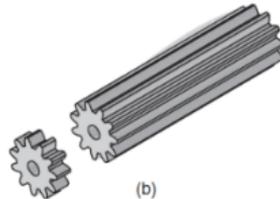
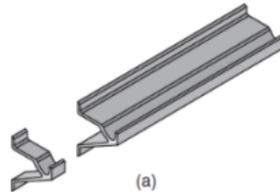
- Caños sin costura: <https://www.youtube.com/watch?v=j-WN-qUgUJY>
- Caños sin costura: <https://www.youtube.com/watch?v=ewA1v-s0Dp4>
- Bulones: <https://www.youtube.com/watch?v=HvbmK3tn0o>

Productos comunes fabricados mediante extrusión:

- Rieles para puertas corredizas, los marcos de ventanas, la tubería de diversas secciones transversales, las escaleras de aluminio y numerosas formas estructurales y arquitectónicas.

Materiales:

- Aluminio
- Cobre
- Acero
- Magnesio
- Plomo



Existen cuatro tipos básicos de extrusión

- Extrusión **directa**
- Extrusión **indirecta** (también conocida como inversa o retroextrusión).
- Extrusión **hidrostática**
- Extrusión **lateral** (menos común)

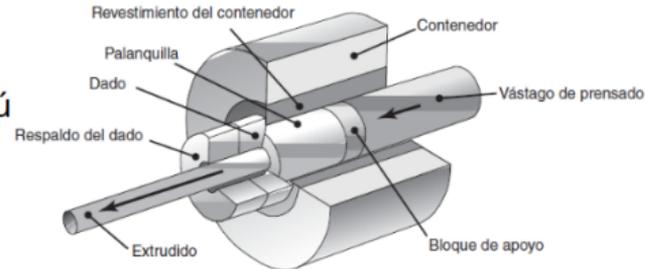
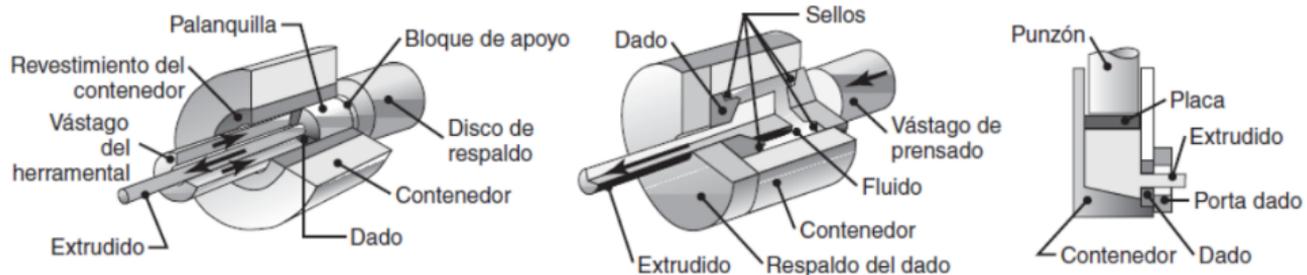
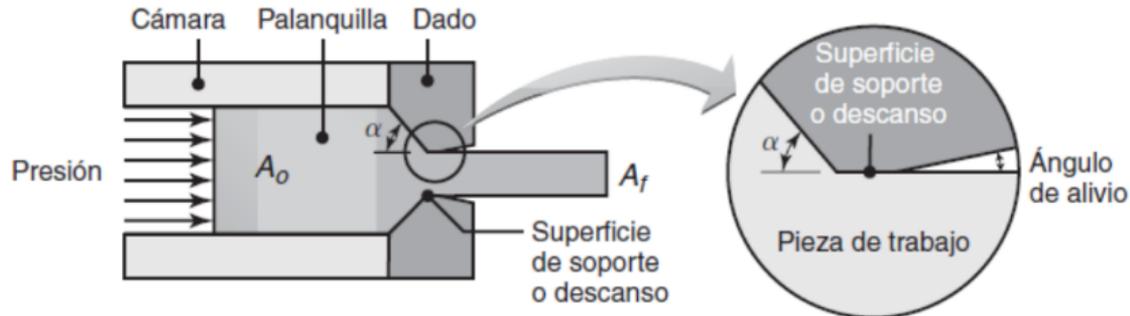


FIGURA 15.1 Esquema del proceso de extrusión directa.



Las variables geométricas en la extrusión son:

- el ángulo del dado (α)
- la relación del área transversal antes y luego de extruir (A_o/A_f), conocida como **relación de extrusión** (R).



Otras variables son la temperatura de la palanquilla, la velocidad a la que avanza el pistón y el tipo de lubricante utilizado.

La fuerza requerida depende de (a) la resistencia del material de la palanquilla, (b) la relación de extrusión, (c) la fricción entre la palanquilla y las demás superficies, y (d) las variables del proceso, como:

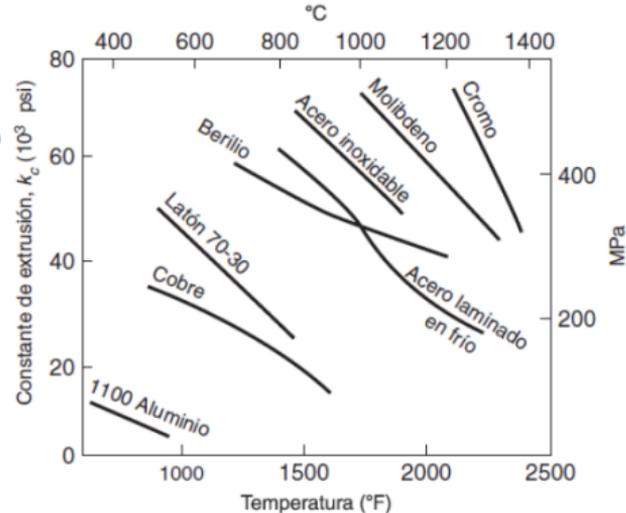
- La temperatura de la palanquilla y la velocidad de extrusión.

La *fuerza de extrusión* (F) se puede estimar a partir de la fórmula:

$$F = A_o k \ln\left(\frac{A_o}{A_f}\right)$$

Donde k es la **constante de extrusión** (que se determina de manera experimental).

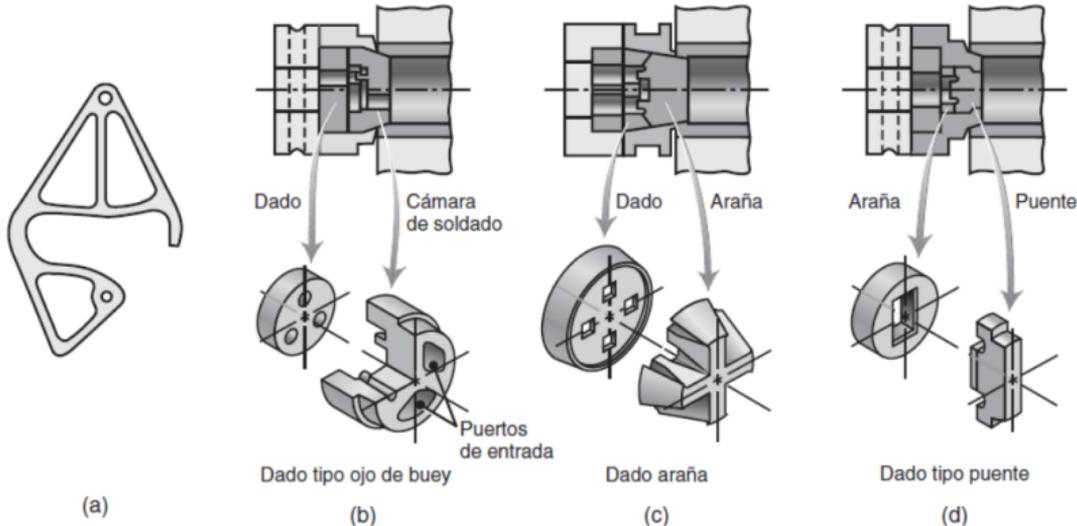
Es una medida de la resistencia del material que se extruye y las condiciones de fricción



Parámetros de extrusión

- Debido su alta ductilidad, el aluminio, el cobre, el magnesio y sus aleaciones, los aceros comunes y los inoxidables, se extruyen con relativa facilidad en diversas formas.
- Las relaciones de extrusión (R) van por lo general de 10 a 100
- Es común que los productos extruidos presenten una longitud menor a 7.5 m debido a la dificultad de manejar magnitudes más grandes, pero pueden tener una longitud hasta de 30 m.
- Las velocidades del pistón varían hasta 0.5 m/s.
- Las tolerancias dimensionales se encuentren entre 0.25-2.5 mm y se incrementen con el aumento de la sección transversal.
- Por lo general, el espesor de la pared se limita a 1 para el aluminio, 3 mm para los aceros al carbono y 5 mm para los aceros inoxidables

- Las *secciones transversales huecas* se pueden extruir con métodos de cámara de soldadura y utilizando diversos dados conocidos como **dados de araña**, **dados tipo ojo de buey** y **dados tipo puente**.



- Materiales para dados y matrices.

- Se utilizan aceros especiales. La dureza del punzón varía entre 60 y 65 HRC y la del dado entre 58 y 62 HRC. Deben tener suficiente resistencia, rigidez, resistencia al desgaste y a la falla por fatiga.

- **Lubricación.** La lubricación es importante en la extrusión en caliente por sus efectos sobre:

- (a) el flujo del material durante la extrusión,
- (b) el acabado y la integridad de la superficie,
- (c) la calidad del producto, y
- (d) las fuerzas de extrusión.

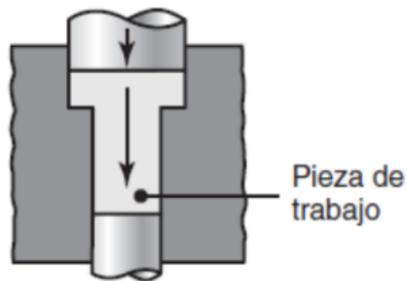
- El *vidrio* es un excelente lubricante para aceros simples e inoxidables y para metales y aleaciones de alta temperatura.
- Se suele usar también un proceso de encamisado en aquellos materiales que tienden a adherirse al dado o al contenedor.

Introducción
Laminación plana
Laminación de formas
Forjado
Extrusión
Proceso de estirado - Trefilado
A leer!!!!

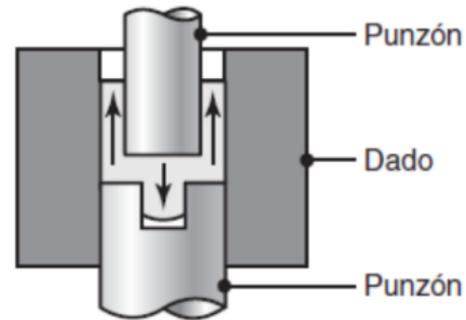
Introducción y Fuerza de extrusión
Extrusión en caliente
Extrusión en frío
Extrusión por impacto
Extrusión Hidrostática
Defectos y equipos



La *extrusión en frío* es un término general que con frecuencia denota una *combinación* de operaciones, como la *extrusión* y el *forjado* directo e indirecto.



(a)



(b)

Se pueden fabricar partes extruidas en frío que pesan hasta 45 kg y que tienen longitudes hasta de 2 m

La *fuerza* (F) en la extrusión en frío se puede estimar a partir de la fórmula:

$$F = 1.7A_o Y_{prom} \epsilon$$

Donde, A_o es el área transversal de la pieza bruta, Y_{prom} el esfuerzo de flujo promedio del metal y ϵ la deformación real a la que se somete la pieza con base en su área transversal original y final; es decir, $\ln(A_o/A_f)$.

Ventajas sobre la extrusión en caliente:

- Mejores propiedades mecánicas como resultado del endurecimiento por trabajo.
- Buen control de las tolerancias dimensionales
- Mejor acabado superficial, en parte debido a la falta de una capa de óxido
- Velocidades y costos de producción que son competitivos respecto de otros métodos de producción de la misma parte, como el maquinado.

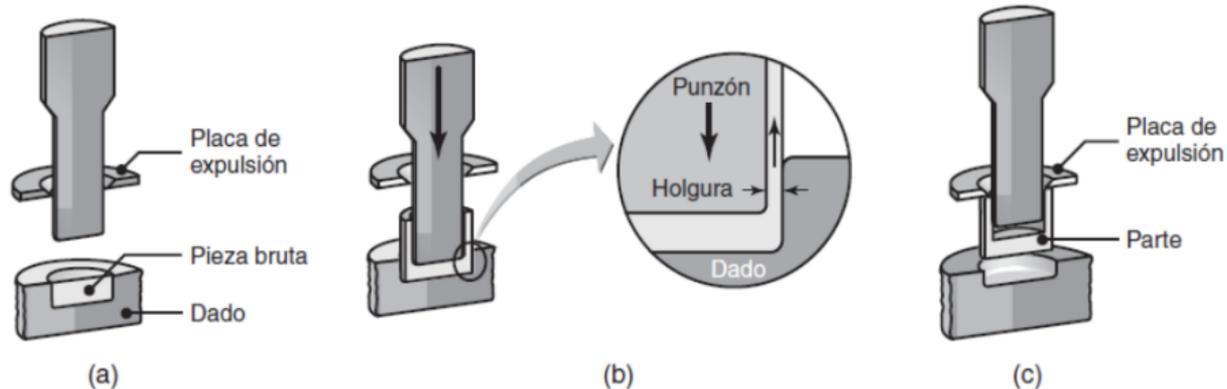
Sin embargo, la magnitud de los esfuerzos en los herramientas de extrusión en frío es muy elevada.

La *lubricación* es crítica, en particular con los aceros

El medio más efectivo de lubricación es la aplicación de un *recubrimiento de conversión de fosfato* en la pieza de trabajo, seguido de un recubrimiento de jabón o cera.

El diseño de los herramientales y la selección apropiada de los materiales para herramientas y dados son cruciales para el éxito de la extrusión en frío.

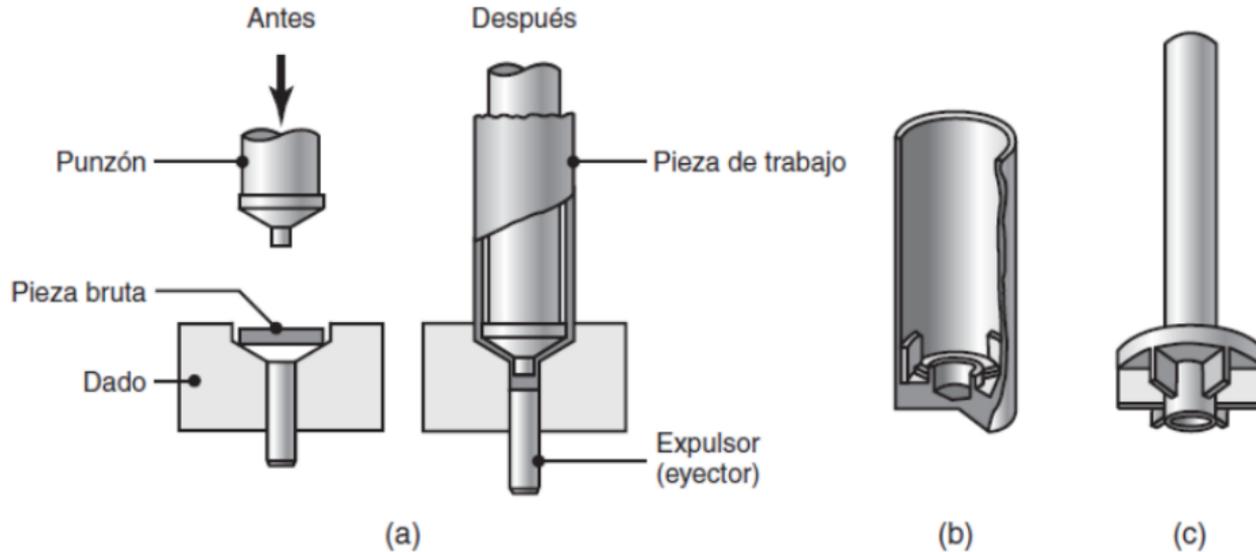
La *extrusión por impacto* es similar a la extrusión indirecta y con frecuencia el proceso se incluye en la categoría de extrusión en frío.



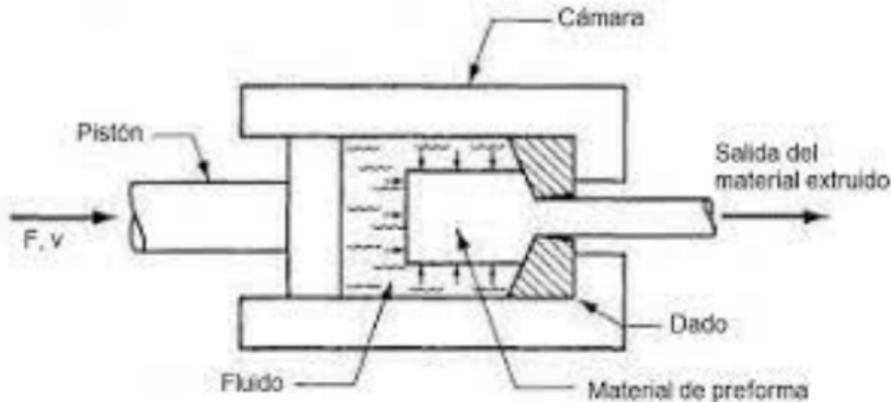
La mayoría de los metales no ferrosos pueden extruirse por impacto en prensas verticales y a altas velocidades de producción de hasta dos piezas por segundo.

Introducción
Laminación plana
Laminación de formas
Forjado
Extrusión
Proceso de estirado - Trefilado
A leer!!!!

Introducción y Fuerza de extrusión
Extrusión en caliente
Extrusión en frío
Extrusión por impacto
Extrusión Hidrostática
Defectos y equipos



En la *extrusión hidrostática*, la presión requerida en la cámara se suministra mediante un pistón a través de un medio fluido incompresible

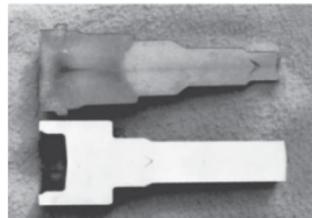


En la *extrusión hidrostática*, la presión requerida en la cámara se suministra mediante un pistón a través de un medio fluido incompresible que rodea la palanquilla.

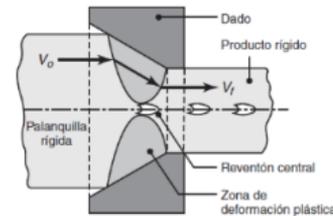
Por la complejidad de este proceso, el uso es limitado.

Existen tres *defectos de extrusión* principales: agrietamiento de la superficie, tubo y agrietamiento interno.

- **Agrietamiento de la superficie.** Si la temperatura de extrusión, la fricción o la velocidad son demasiado elevadas, las temperaturas de la superficie pueden aumentar considerablemente, lo que provocaría que la superficie se agrietase.
- **Tubo.** Se da cuando se tienden a acumular los óxidos e impurezas de la superficie en el centro de la palanquilla, de manera parecida a la de un embudo. Se genera por altos gradiente de extrusión y fricción.
- **Agrietamiento interno.** La tendencia al agrietamiento central (*a*) aumenta con el incremento del ángulo del dado; (*b*) aumenta al incrementarse la cantidad de impurezas, y (*c*) disminuye al reducirse la relación de extrusión y la fricción.



(a)



(b)

Resumen de cálculos

- En el proceso de extrusión el área inicial S_0 pasa a la final S_1 y la altura inicial h_0 a la final h_1

$$F_m = S_0 \times R_d \quad F_m = S_0 \times R_d \times \ln \frac{S_0}{S_1}$$

$$F_1 = S_1 \times R_d$$

Las respectivas deformaciones serán:

- Reducción:

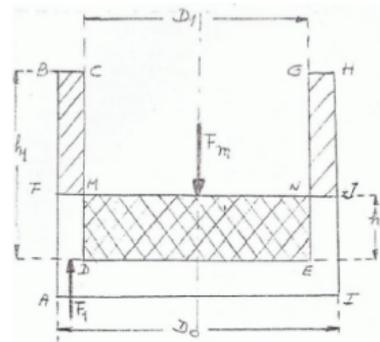
$$\varphi_a = -\ln \frac{S_0}{S_1} = \ln \frac{S_0}{S_1}$$

- Alargamiento:

$$\varphi_b = \ln \frac{h_1}{h_0}$$

- Tensión en punzón y matriz

$$\sigma = R_d \times \ln \frac{S_0}{S_1}$$



Deformación $\Phi\%$	$R_d [Kg/mm^2]$
0 a 10	10 a 13
10 a 20	13 a 16
20 a 40	16 a 19
40 a 60	19 a 20
> 60	20 a 25

Ejemplos

- <https://geminigroup.net/engineered-tooling-solutions/aluminum-extrusion-tooling/>
- https://www.youtube.com/watch?v=R_SBOxAezMM
- <https://www.youtube.com/watch?v=MG3Ls7jrr2o>
- <https://www.youtube.com/watch?v=ELgtjeJyFw8>
- <https://www.youtube.com/watch?v=b-CFC-vkQWs>

Fuerza de trefilado

La expresión para la fuerza de estirado bajo condiciones ideales y sin fricción es similar a la de la extrusión. Se determina mediante la expresión:

$$F = Y_{prom} A_f \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad (4)$$

Puesto que debe realizarse más trabajo para vencer la fricción, la fuerza aumenta con el incremento de esta.

$$F = Y_{prom} A_f \left[\left(1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (5)$$

donde μ es el coeficiente de fricción y α es el ángulo de la matriz en radianes.

Fuerza de trefilado

Se puede demostrar que, en teoría y sin fricción, la relación máxima posible de área transversal esta dada por:

$$\frac{A_0}{A_f} = e = 2,7183 \quad (6)$$

y la reducción de área $\left(r = \frac{A_0 - A_f}{A_0}\right)$ máxima posible es:

$$r_{max} = \frac{e - 1}{e} = 0,632 \quad (7)$$

es decir, que la reducción máxima posibles es del 63% por pase.

Estirado de otras formas

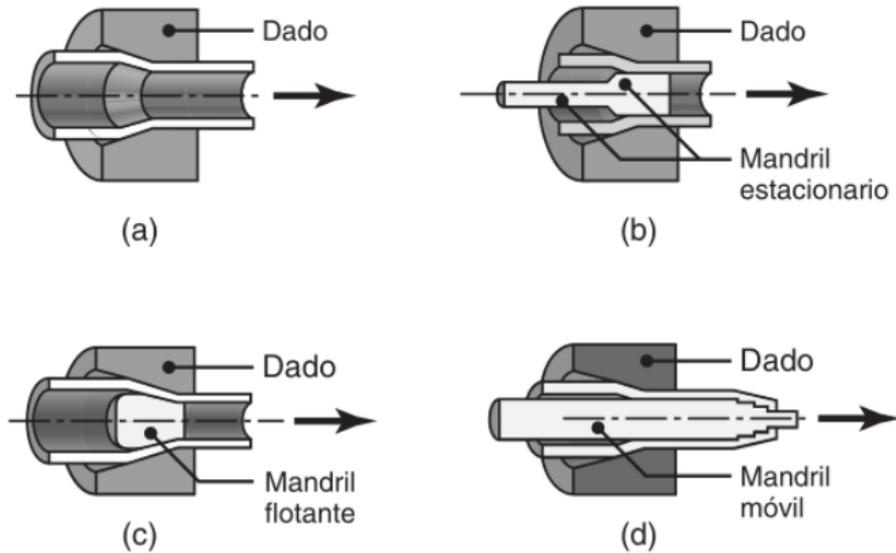


Figura: Estirado de tubos (caños)

Diseño de la trefila

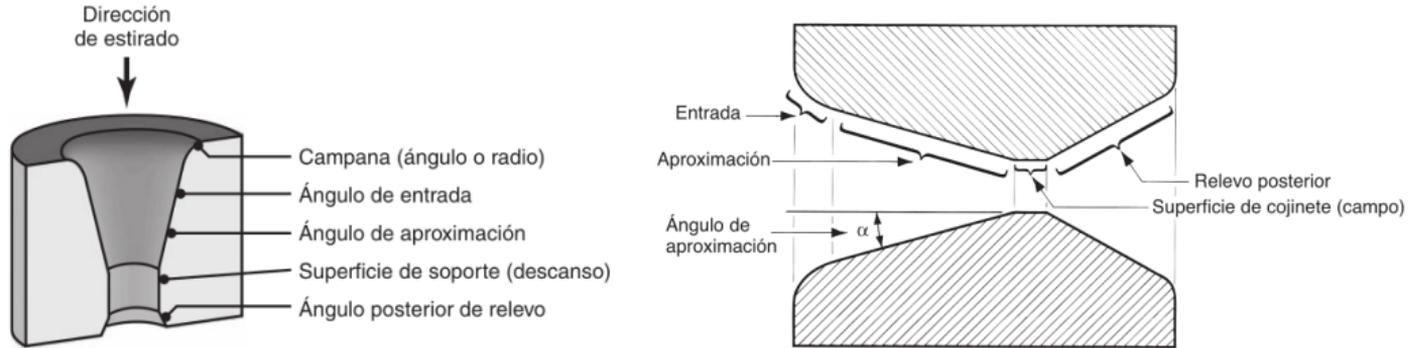
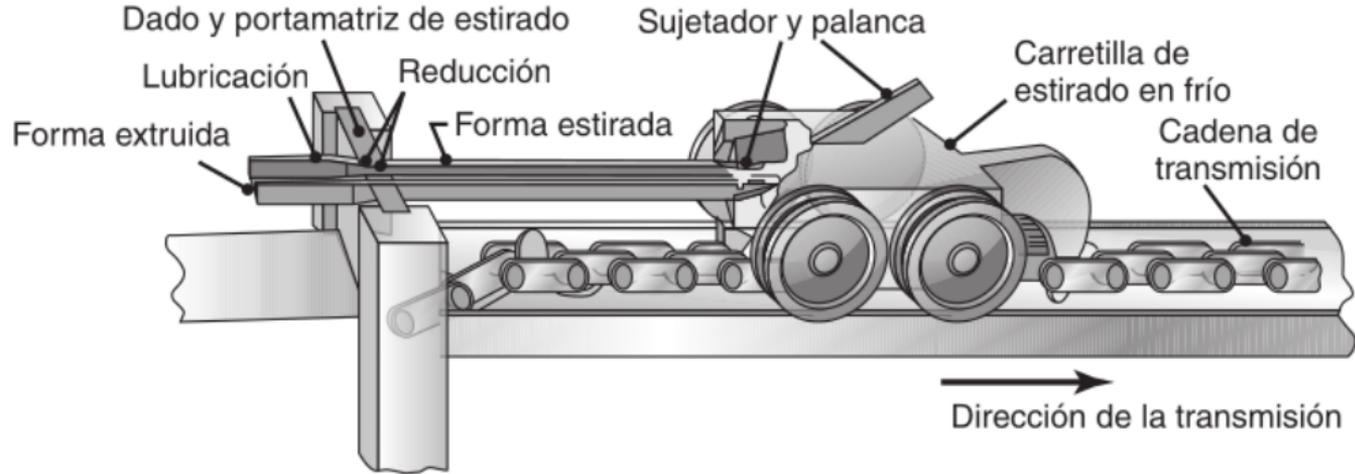
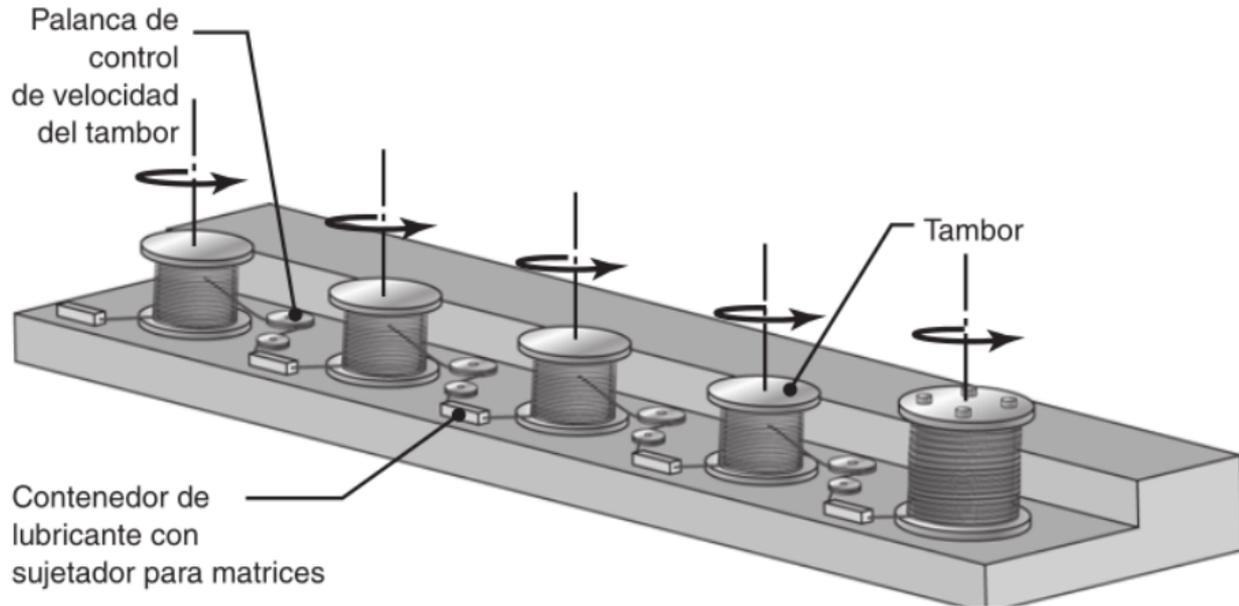


Figura: Diseño de la matriz (trefila)

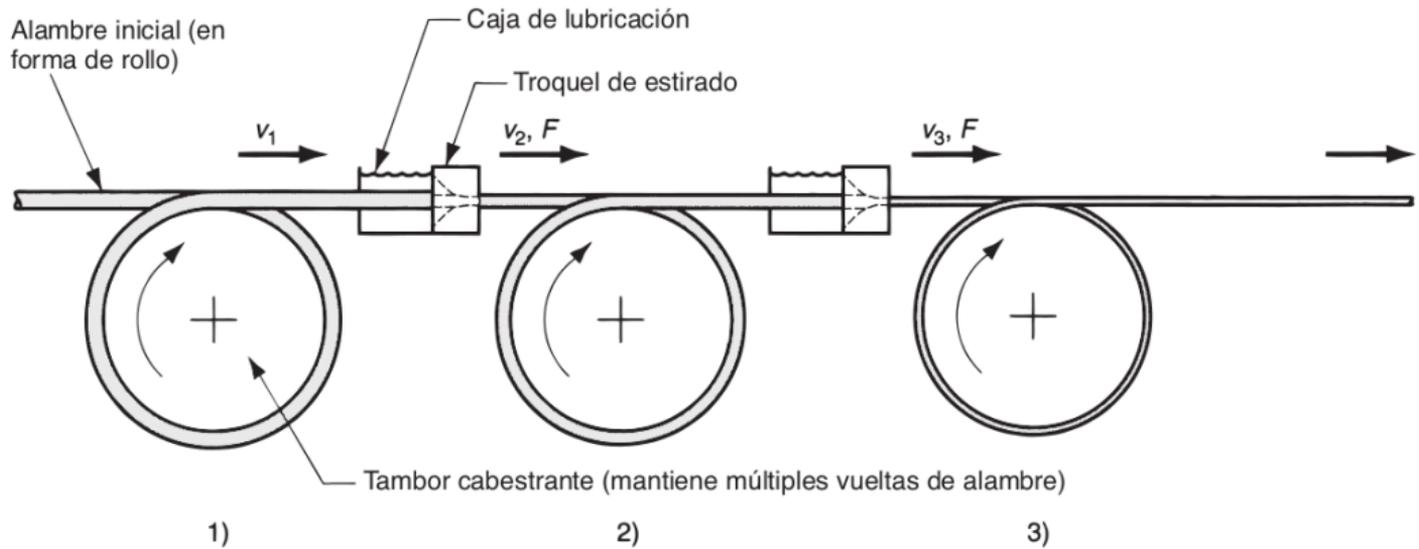
Práctica del trefilado



Práctica del trefilado



Práctica del trefilado



Ejemplos

- <https://www.youtube.com/watch?v=aN4WomGYLs0>
- <https://www.youtube.com/watch?v=KTFXoM3ubyA>

