



Estudio y Ensayo de Materiales Industriales

Deformación plástica



Contenido

- **Deformación plástica**
- **Endurecimiento por deformación**
- **Recuperación, recristalización y crecimiento de grano**
- **Trabajado en caliente y en frío**
- **Operaciones de conformado por deformación plástica: Laminación en frío y en caliente, forja, doblado, etc.**

Bibliografía:

Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Cuarta edición, International Thomson. **Donald R. Askeland, Pradeep P. Phulé.**

Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Tercera edición, Mc Graw Hill. **William Smith.**

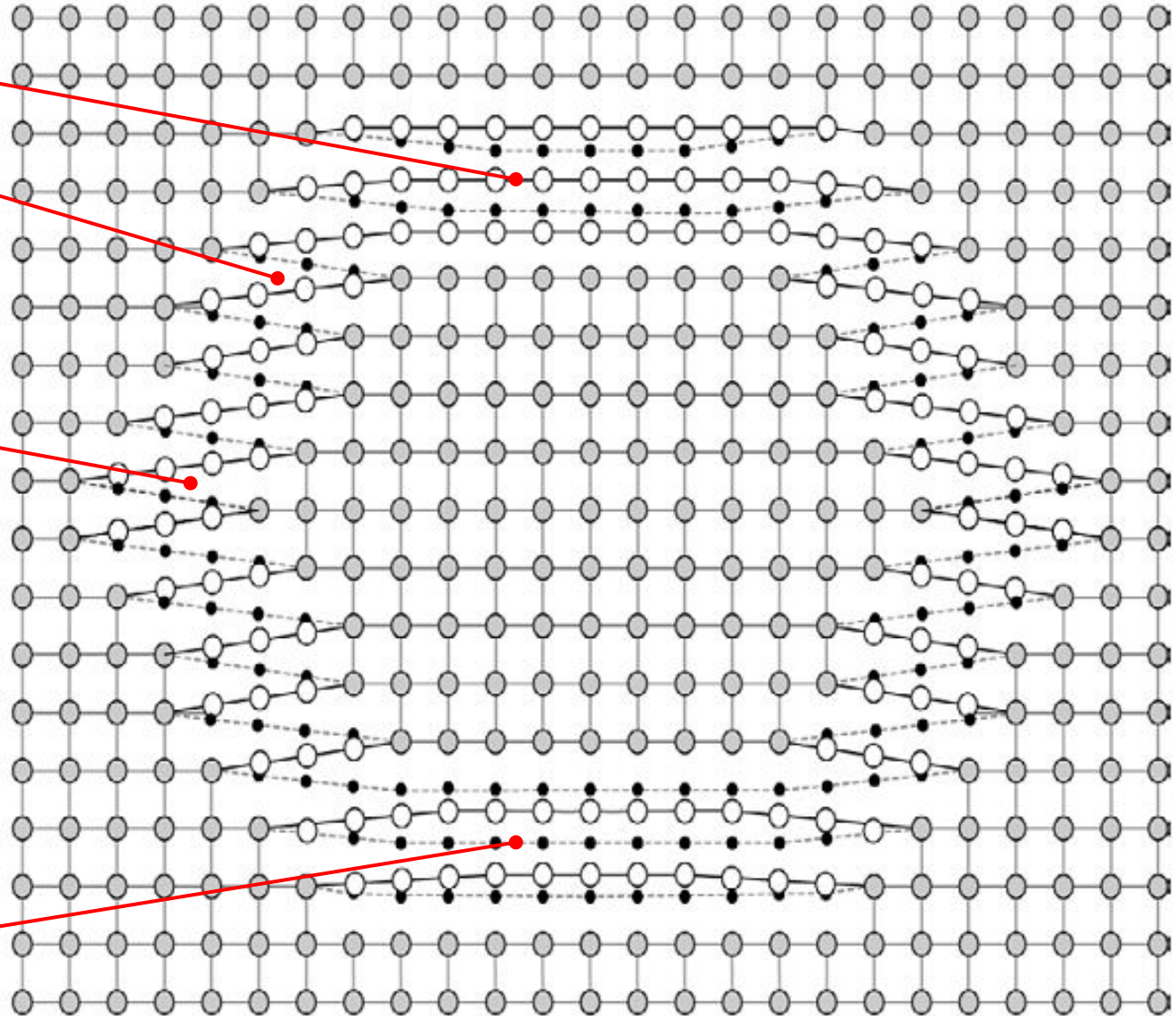
Dislocaciones

Dislocación de borde
(afuera)

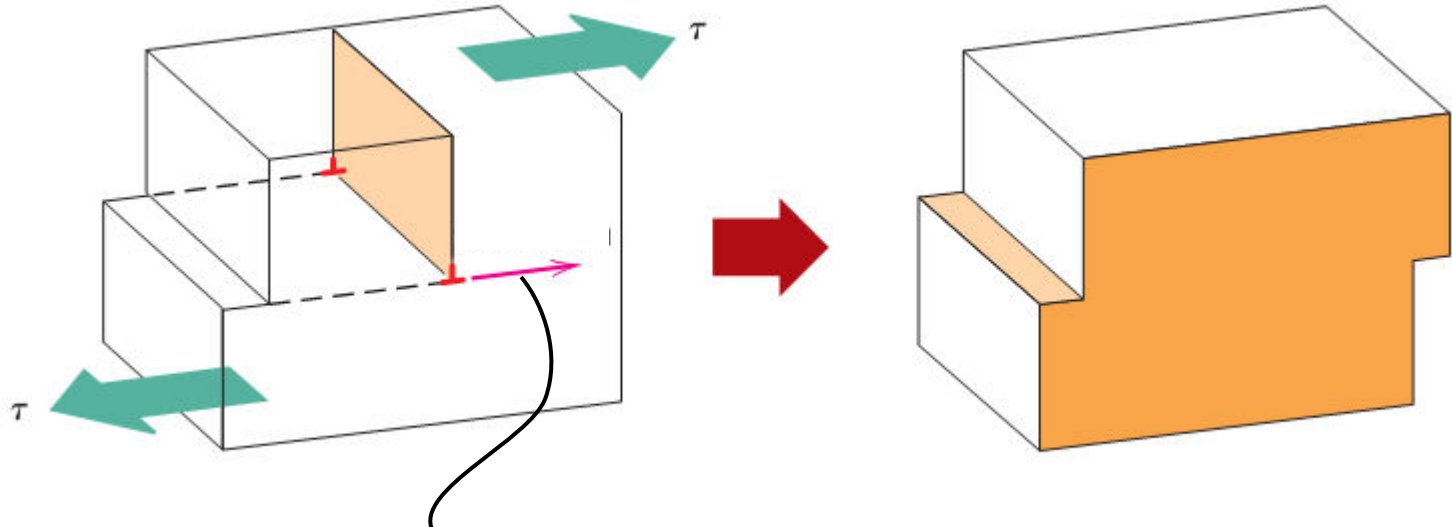
Dislocación mixta

Dislocación de hélice

Dislocación de borde
(adentro)

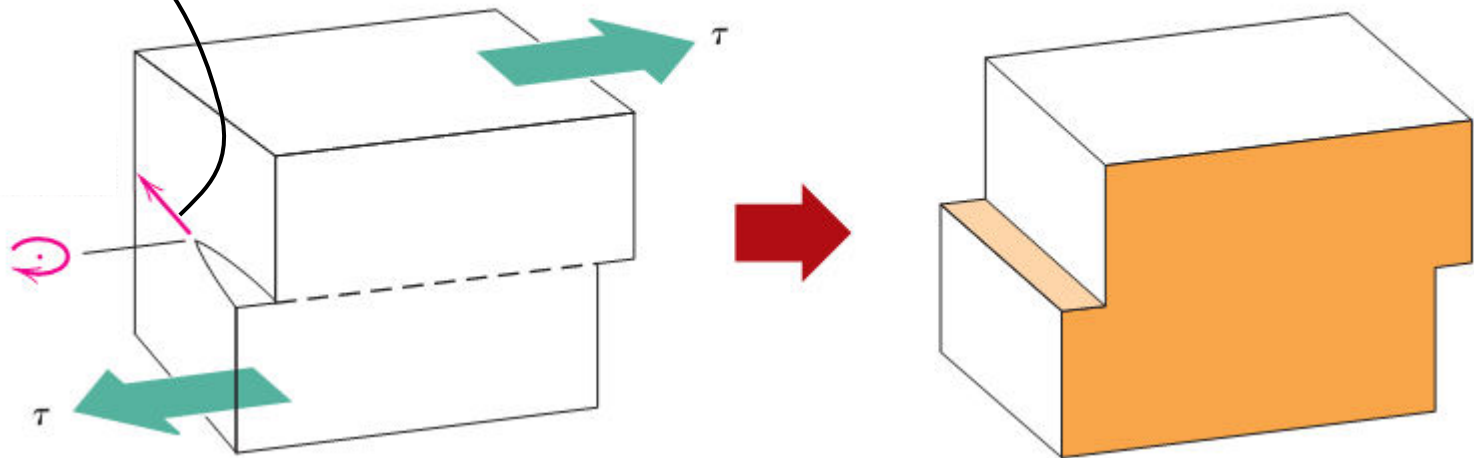


Movimiento de dislocaciones



Dirección del movimiento

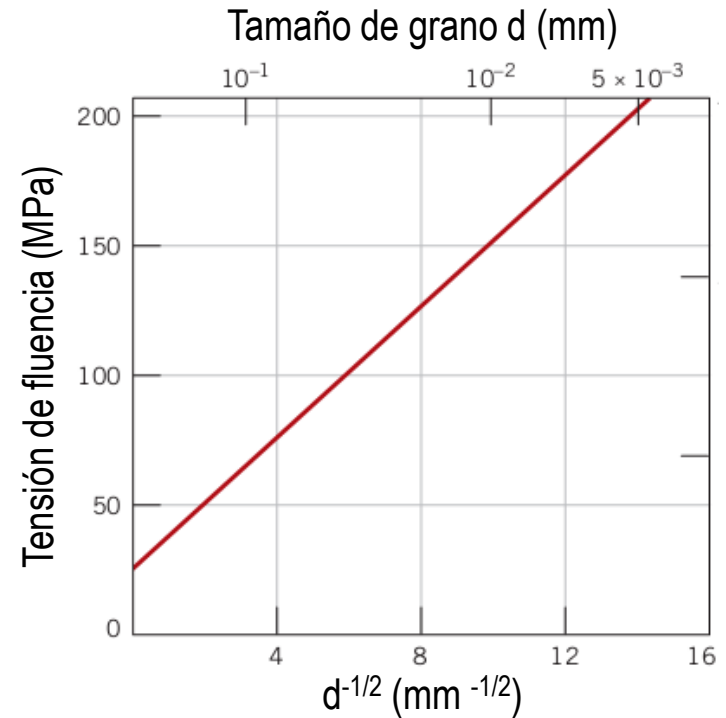
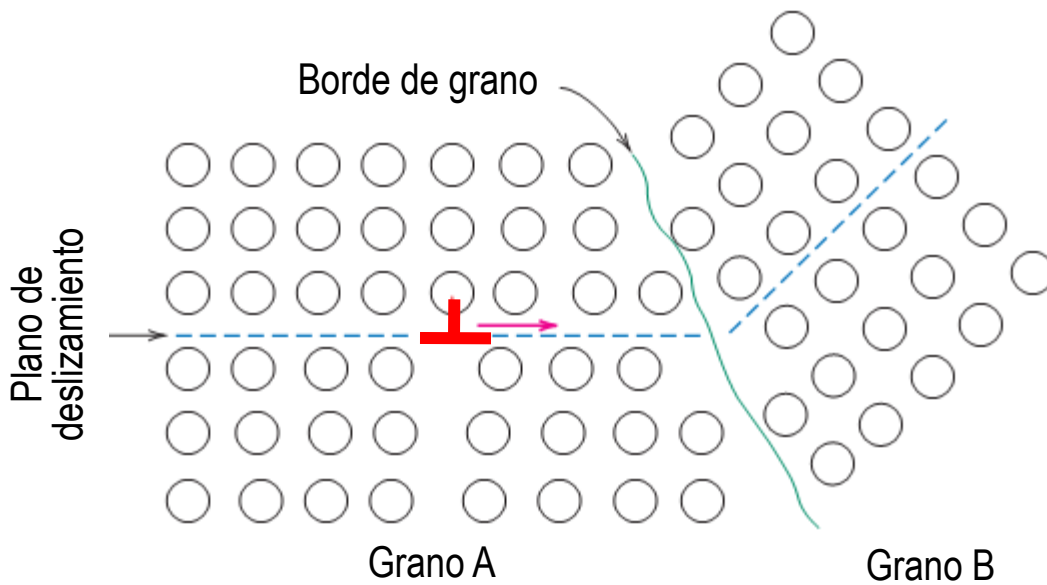
Dirección del movimiento



Endurecimiento por tamaño de grano

- Los bordes de grano actúan como barreras para el deslizamiento de las dislocaciones.
- La resistencia de los bordes de grano es mayor cuanto mayor es el grado de desalineación de los granos.
- Cuanto menor sea el tamaño de grano, mas cantidad de barreras para el deslizamiento.

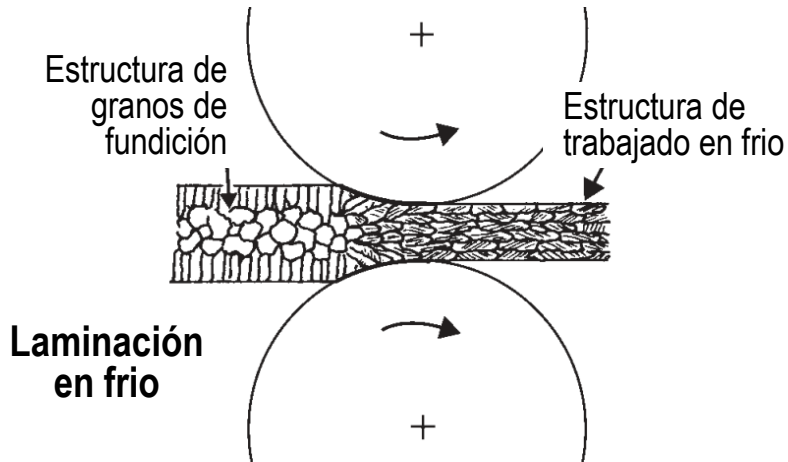
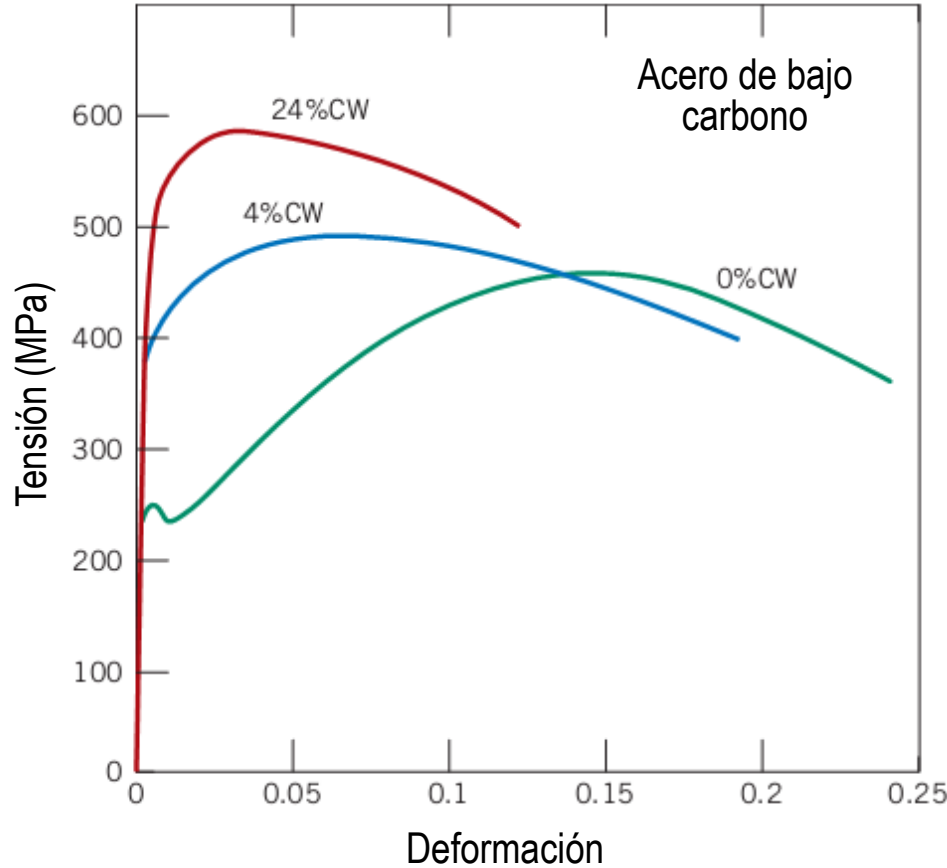
Ecuación de Hall-Petch: $\sigma_{yield} = \sigma_o + k_y d^{-1/2}$



Tensión de fluencia en función del tamaño de grano en latón, 70Cu-30Ni.

Endurecimiento por deformación

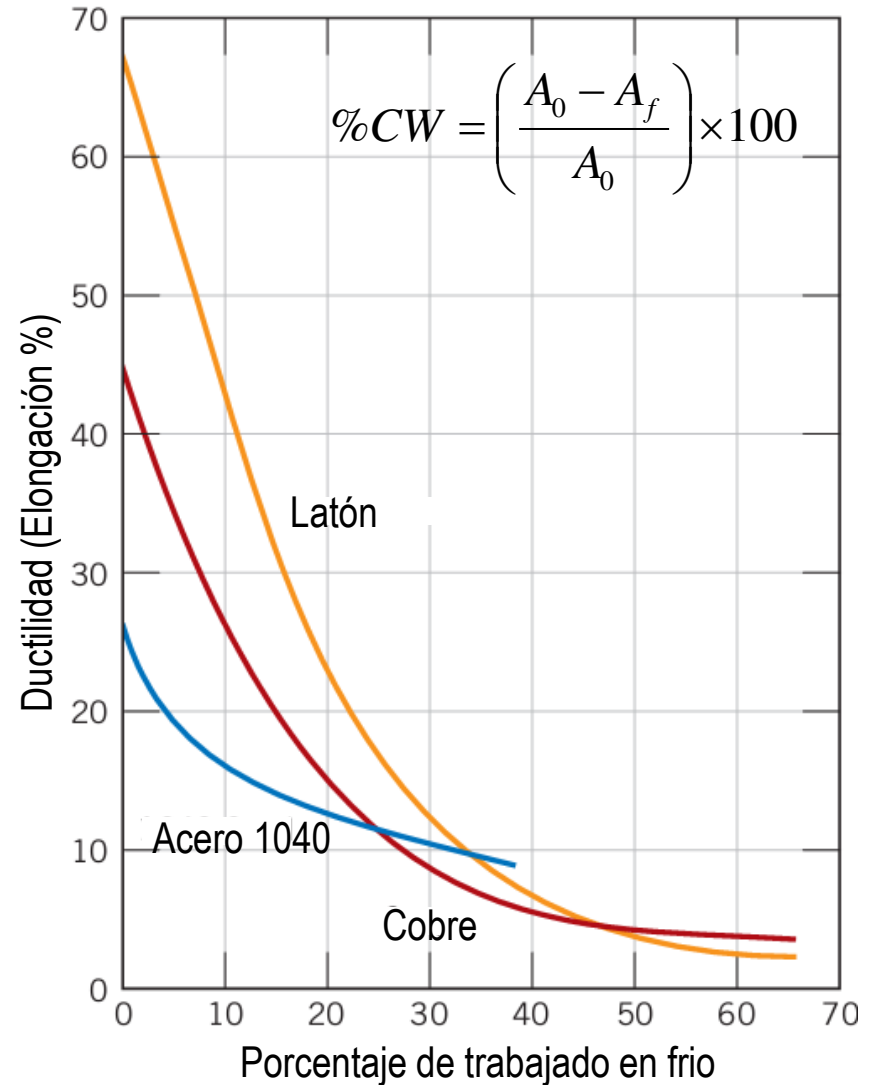
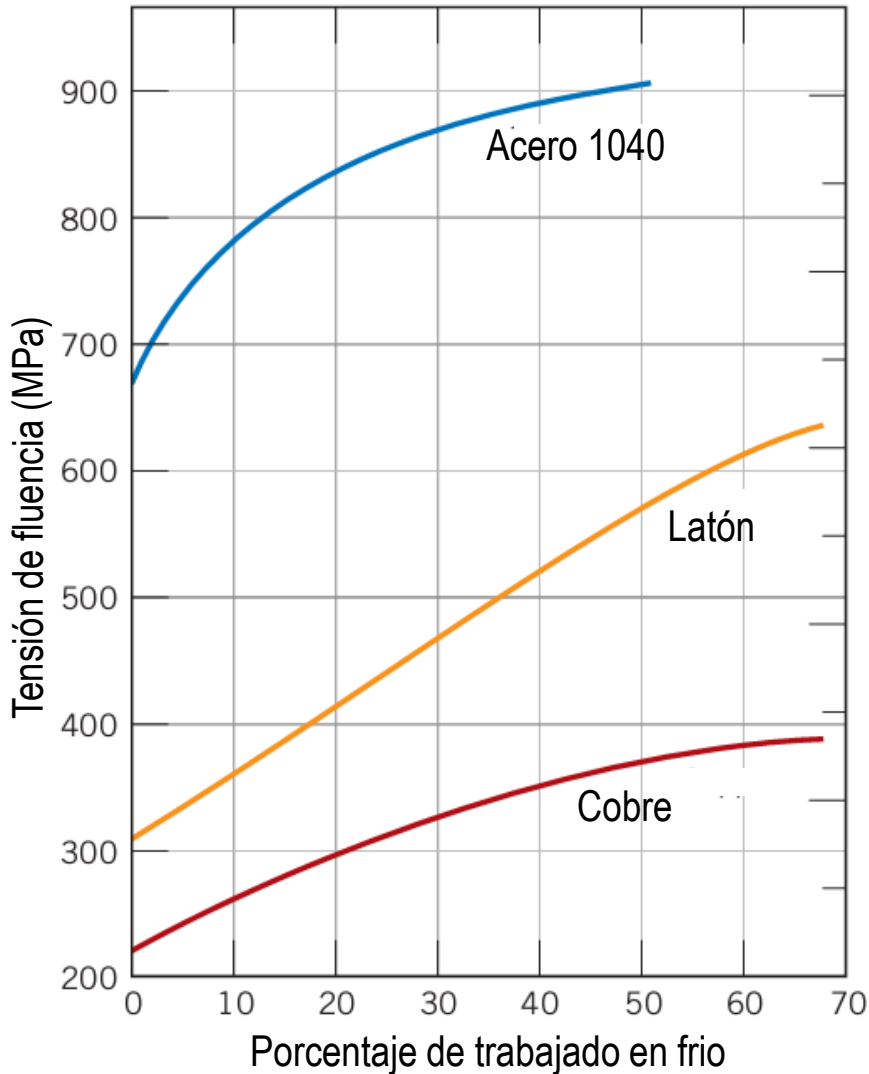
- La **deformación en frío** (con respecto a la temperatura de fusión) en los metales provoca su **endurecimiento y pérdida de ductilidad**.
- Este fenómeno se produce por la **creación y multiplicación de dislocaciones**, reduciendo la distancia media entre dislocaciones. La interacción entre dislocaciones es repulsiva en promedio, reduciendo la movilidad de las mismas y impidiendo el deslizamiento.
- La deformación en frío modifica la estructura de granos e inclusiones (textura).



$$\%CW = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$



Endurecimiento por deformación

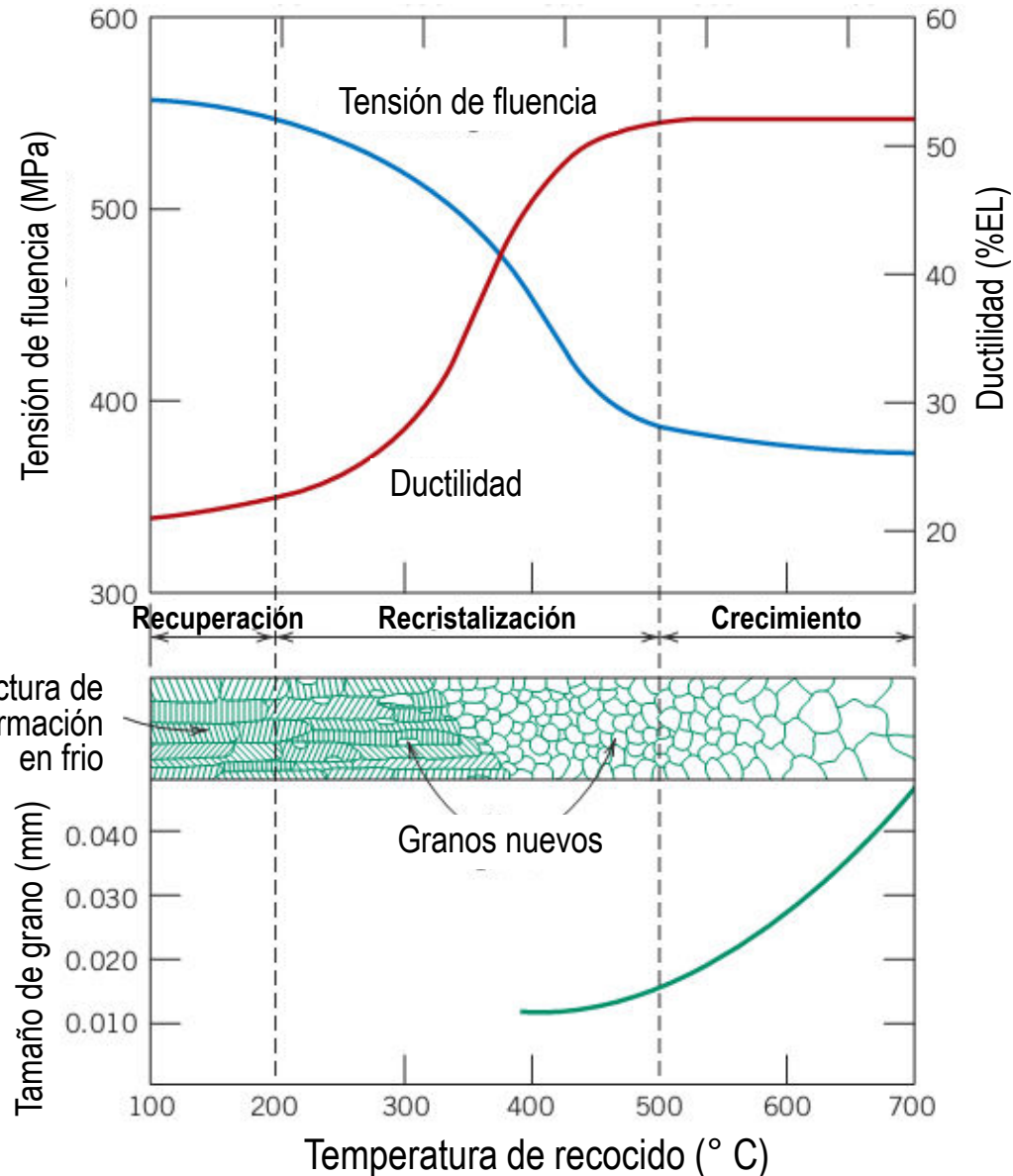


Recuperación, recristalización, crecimiento

La estructura de trabajado en frío se puede revertir mediante un tratamiento térmico (recocido)

- **Recuperación:** Se mueven las dislocaciones (en ausencia de fuerzas externas) por difusión atómica a alta temperatura, reduciendo su número.
- **Recristalización:** Se forman nuevos granos libres de deformación, con baja densidad de dislocaciones, mediante difusión en borde de grano.
- **Crecimiento de grano:** Algunos granos crecen a costa de otros, minimizando la superficie. No necesita partir de material recristalizado, ocurre en todos los materiales policristalinos, metales y cerámicos.

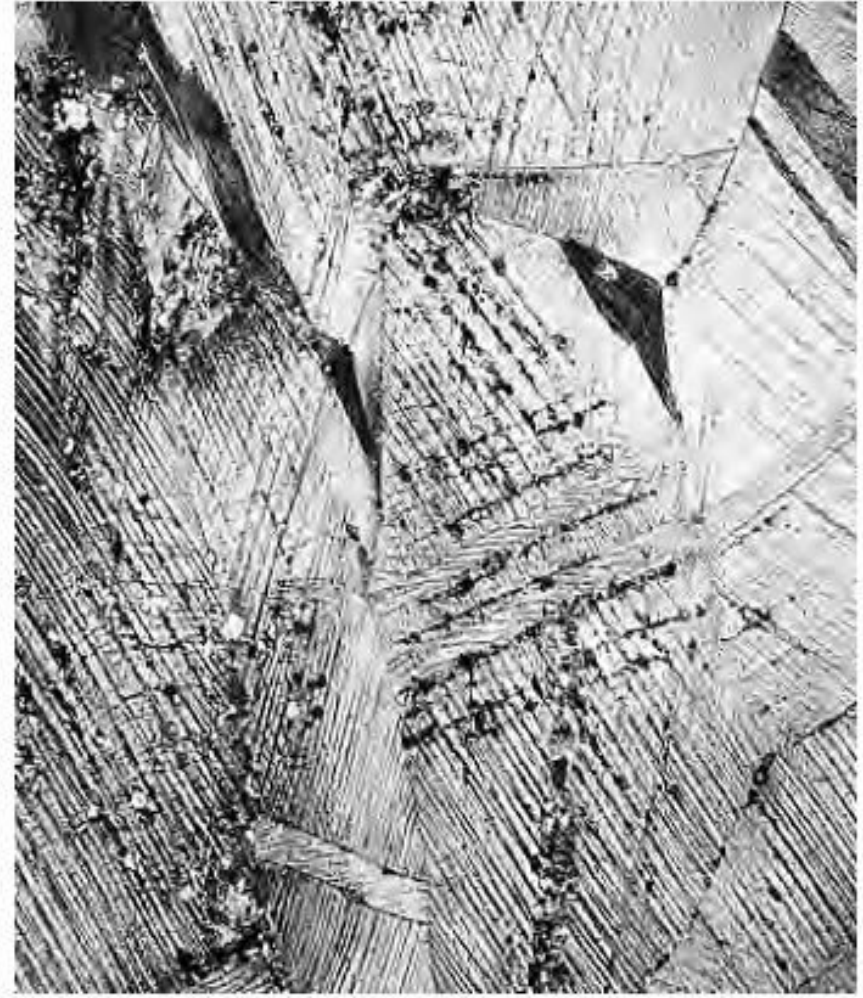
Propiedades mecánicas de latón (Cu-Zn) luego de 1 hora de recocido a diferentes temperaturas



Recuperación, recristalización, crecimiento



Latón (Cu-Zn) x75: Trabajado en frío
(33%CW)



Latón (Cu-Zn) x75: Recristalización parcial,
3s a 580° C

Recuperación, recristalización, crecimiento



Latón (Cu-Zn) x75: Recristalización parcial,
4s a 580° C



Latón (Cu-Zn) x75: Recristalización total,
8s a 580° C

Recuperación, recristalización, crecimiento



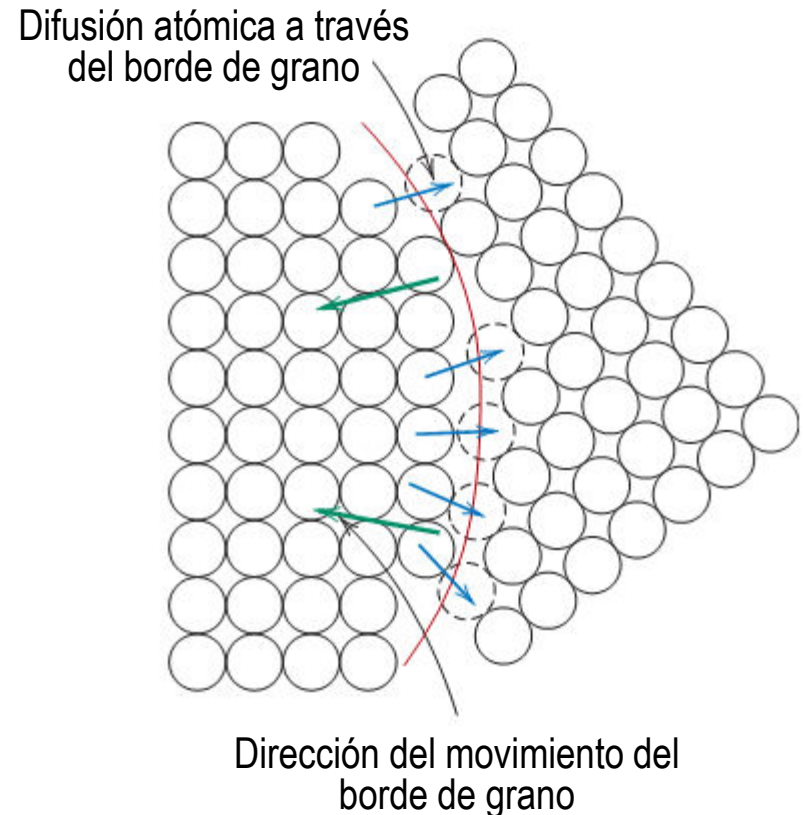
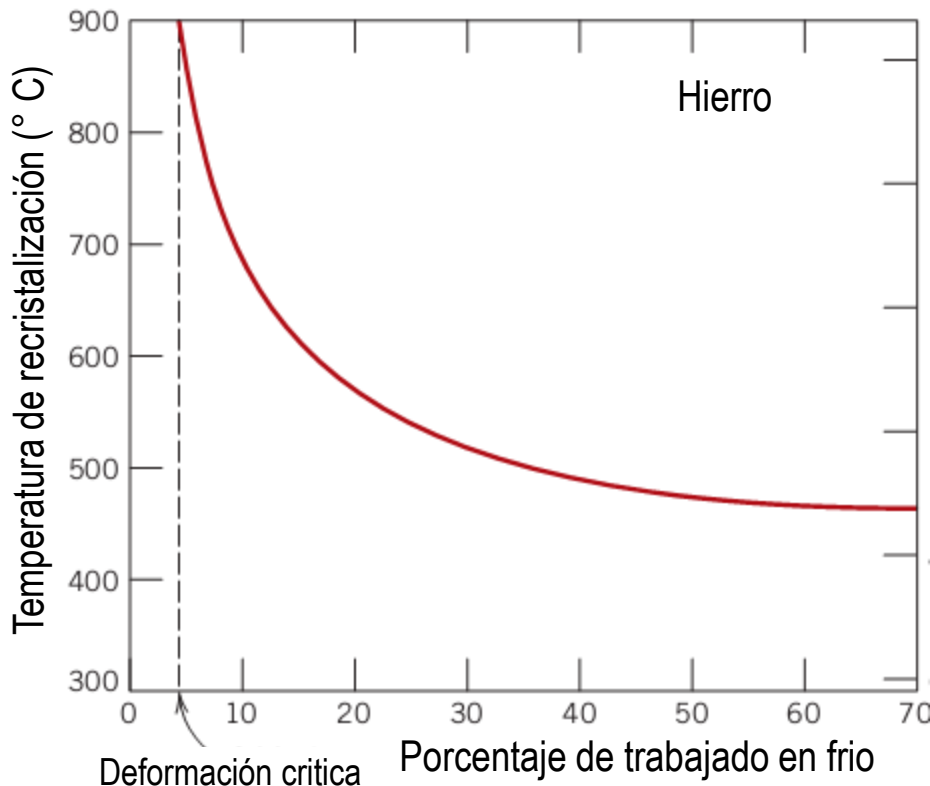
Latón (Cu-Zn) x75: Crecimiento,
15m a 580° C



Latón (Cu-Zn) x75: Crecimiento,
10m a 700° C

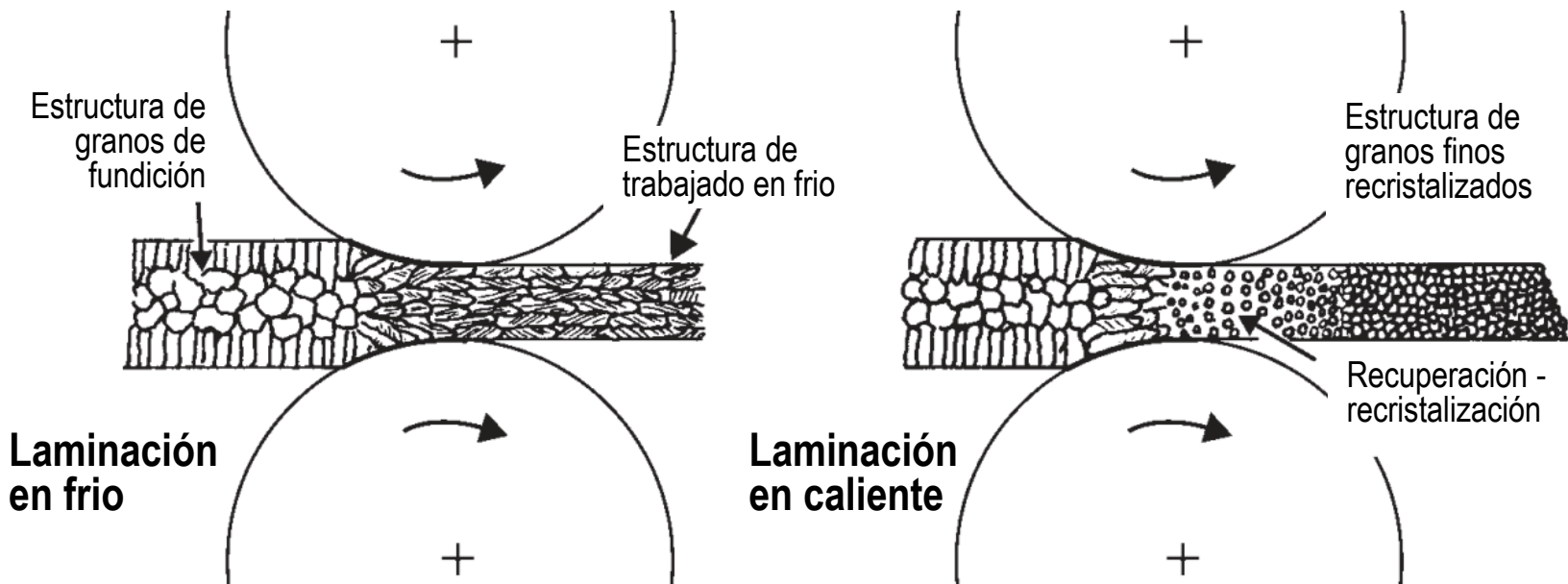
Recuperación, recristalización, crecimiento

- La temperatura de recristalización depende de la cantidad de trabajado en frío. Existe un mínimo de deformación para que se produzca la recristalización.
- Los procesos de recristalización y crecimiento de grano se producen por difusión en borde de grano a alta temperatura.

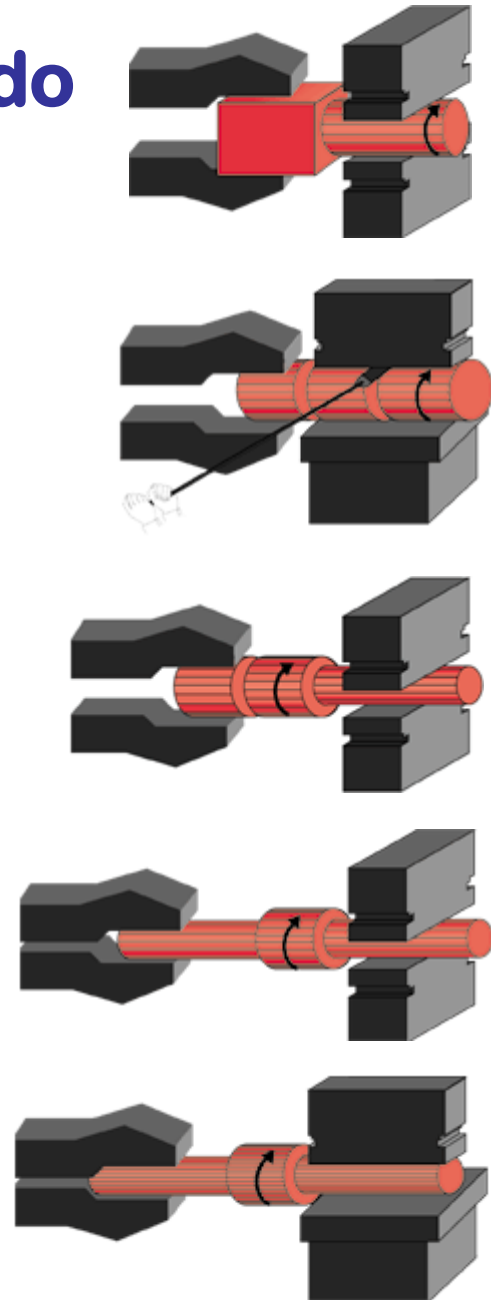
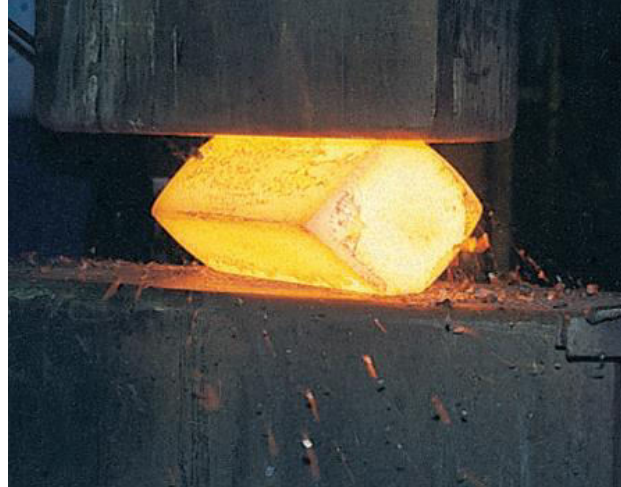
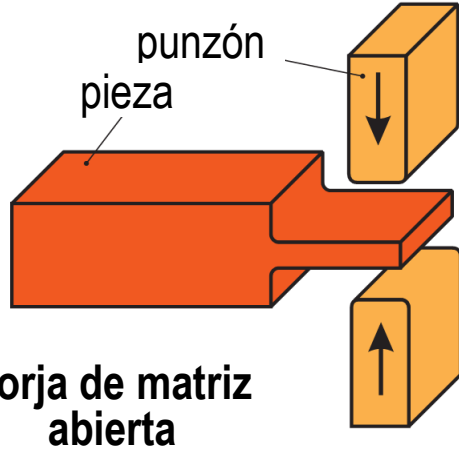


Operaciones de conformado

- Las operaciones de conformado son aquellas en las que se modifica la forma de una pieza metálica mediante deformación plástica.
- **Trabajado en caliente:** cuando la deformación se logra a temperaturas por arriba de la temperatura de recristalización. En las operaciones de trabajado en caliente permiten grandes deformaciones, las cuales pueden repetirse sucesivamente permaneciendo el material blando y dúctil. La oxidación a alta temperatura provoca un pobre acabado superficial. $T > 0,6.T_f$
- **Trabajado en frío:** Por debajo de la temperatura de recristalización. La deformación produce un incremento de la resistencia y reducción de la ductilidad. La cantidad de deformación es limitada. Mejor acabado superficial y propiedades mecánicas finales. $T < 0,3-0,4.T_f$



Operaciones de conformado



Temperaturas de forja (° C):

Acero(0,1%C): 1290

Acero(0,6%C): 1200

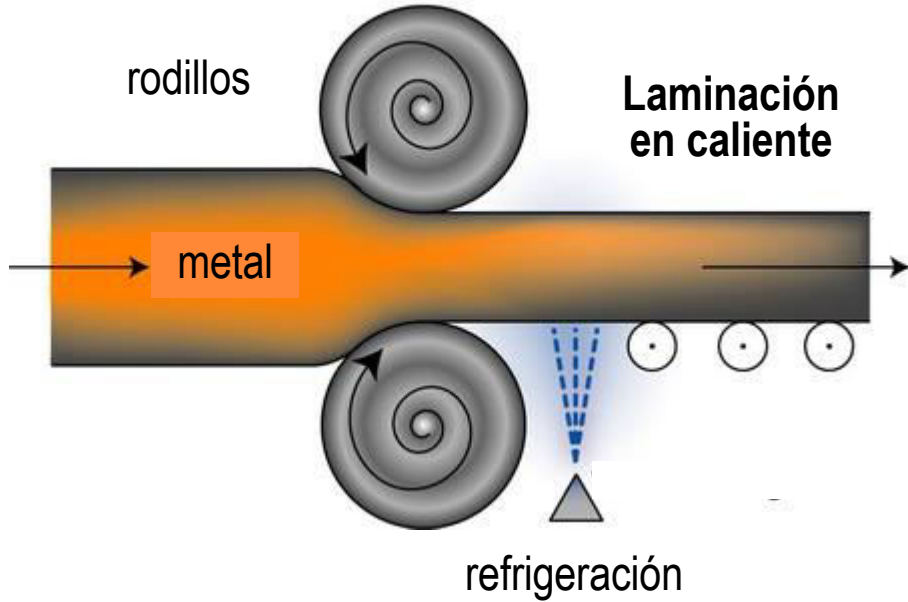
Acero(1,1%C): 1110

Cobre: 900

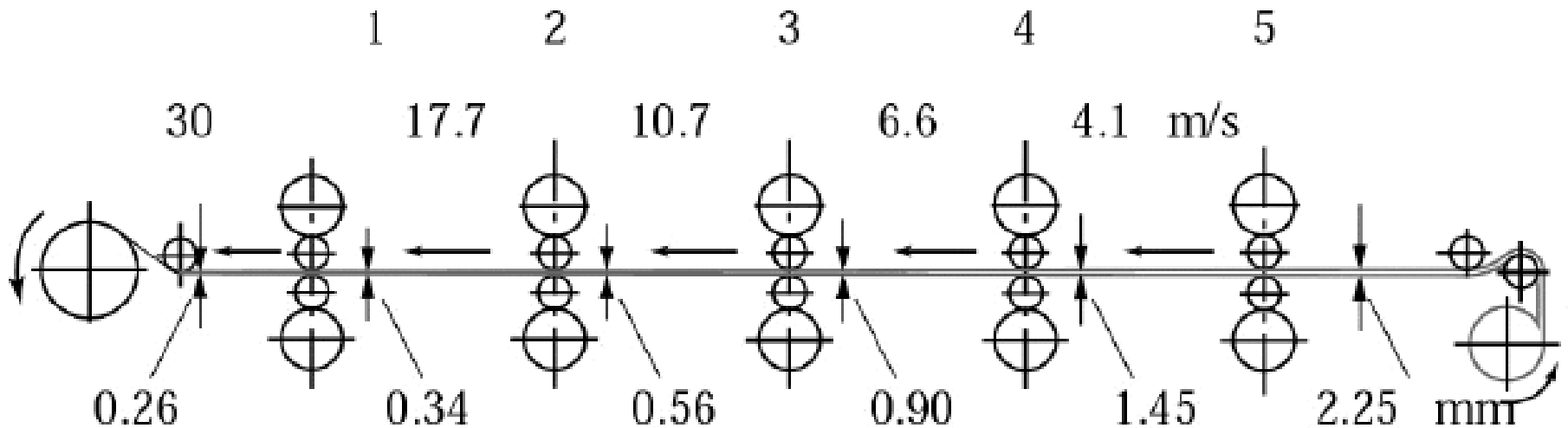
Aluminio: 540



Operaciones de conformado



Operación de laminación en tándem



Operaciones de conformado



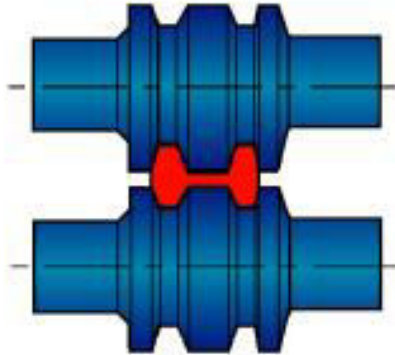
Laminación
en caliente



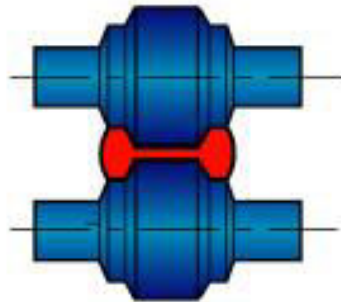
Operaciones de conformado

Laminación-
forjado o
laminación de
forma

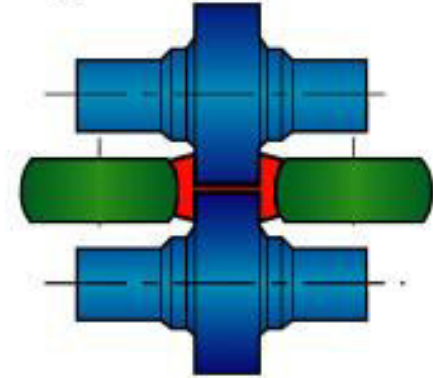
Etapa 1



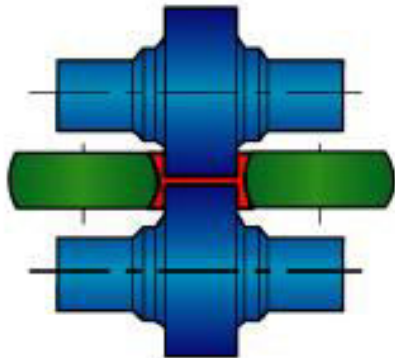
Etapa 2



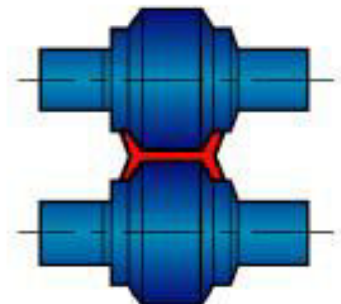
Etapa 3



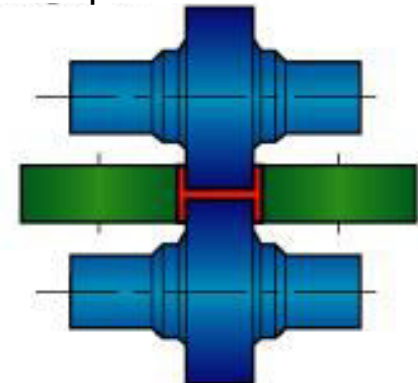
Etapa 4



Etapa 5



Etapa 6



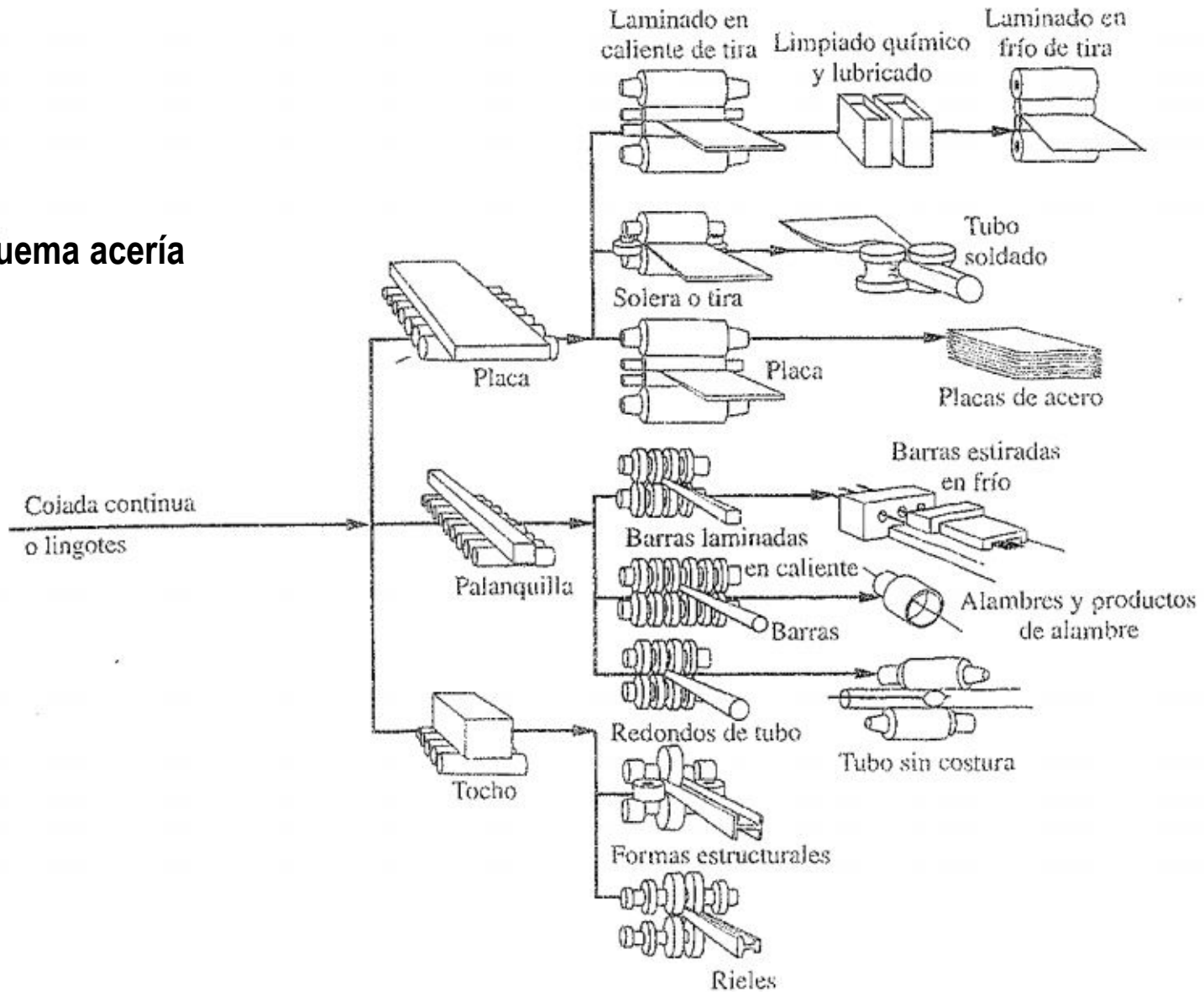
Operaciones de conformado

Laminación en frío

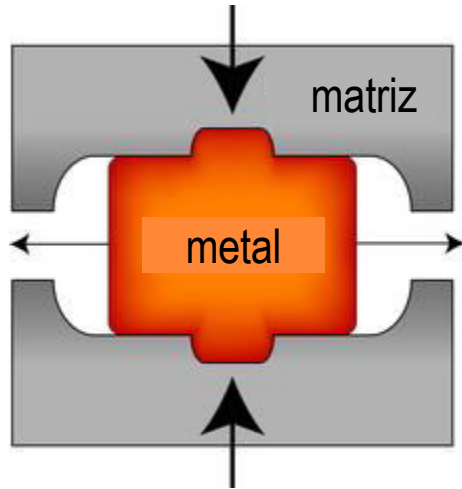


Operaciones de conformado

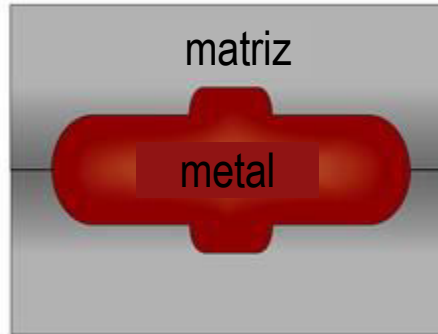
Esquema acería



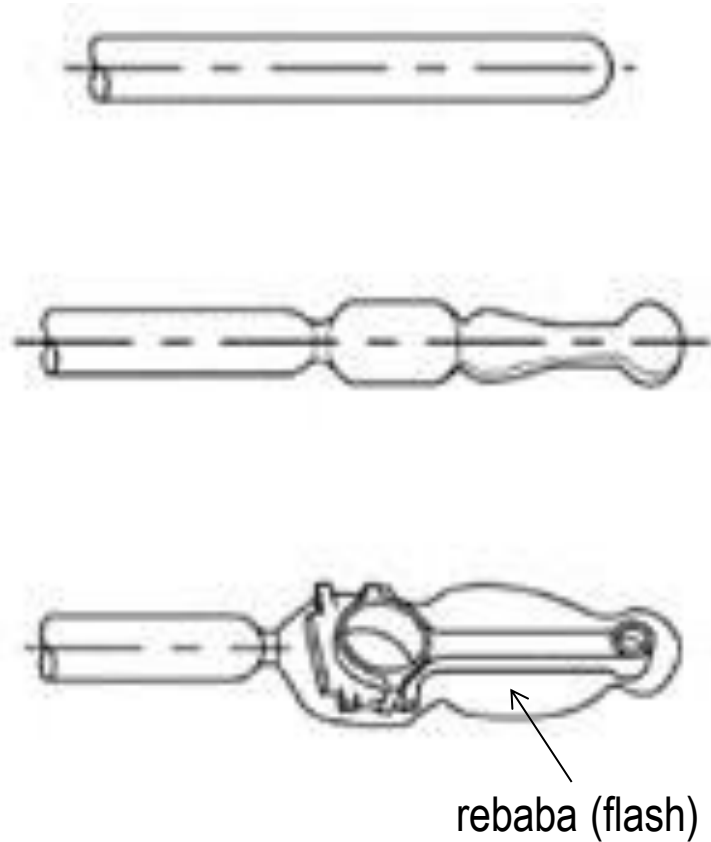
Operaciones de conformado



Forja en matriz cerrada



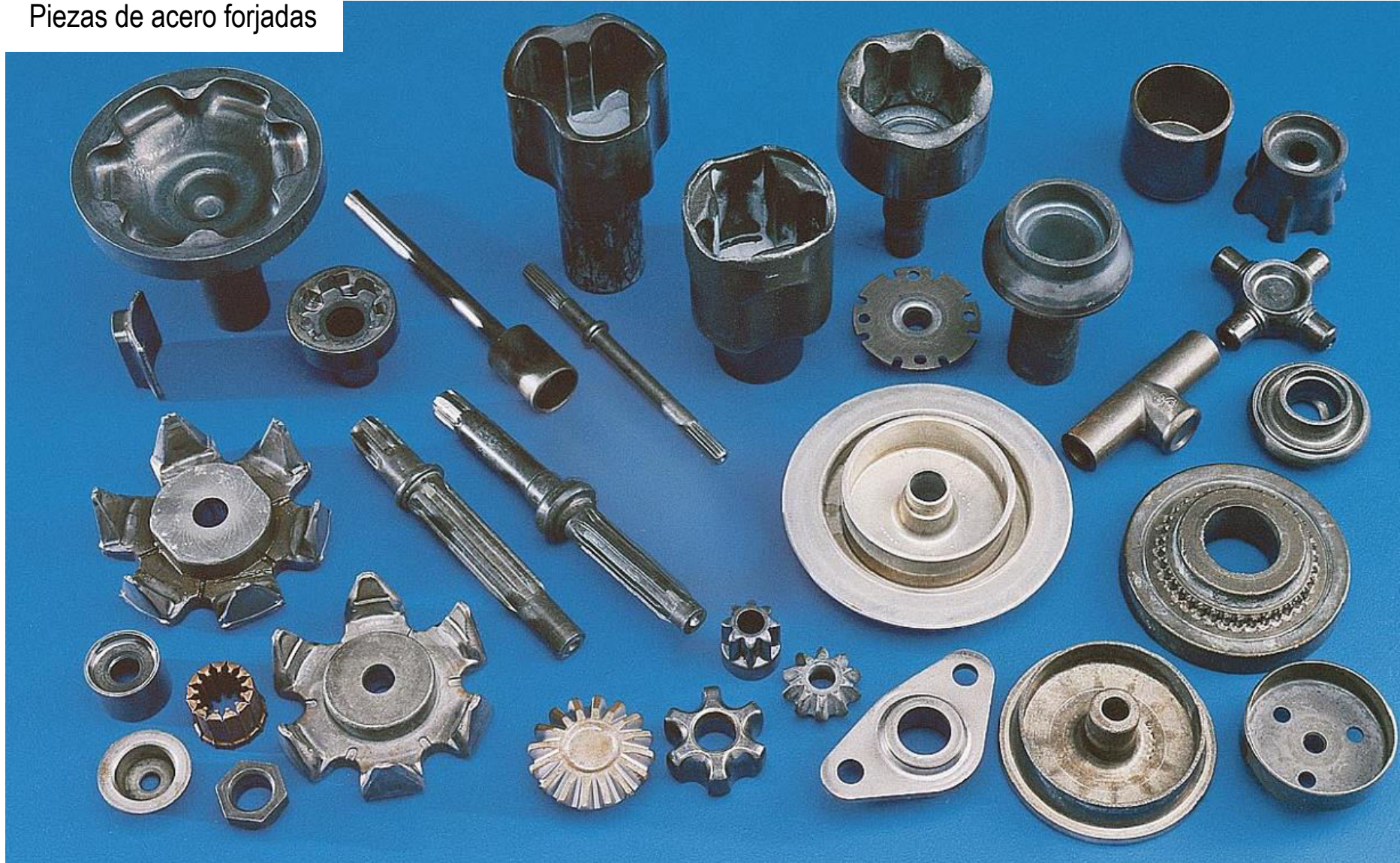
Operaciones para forjar una biela



rebaba (flash)

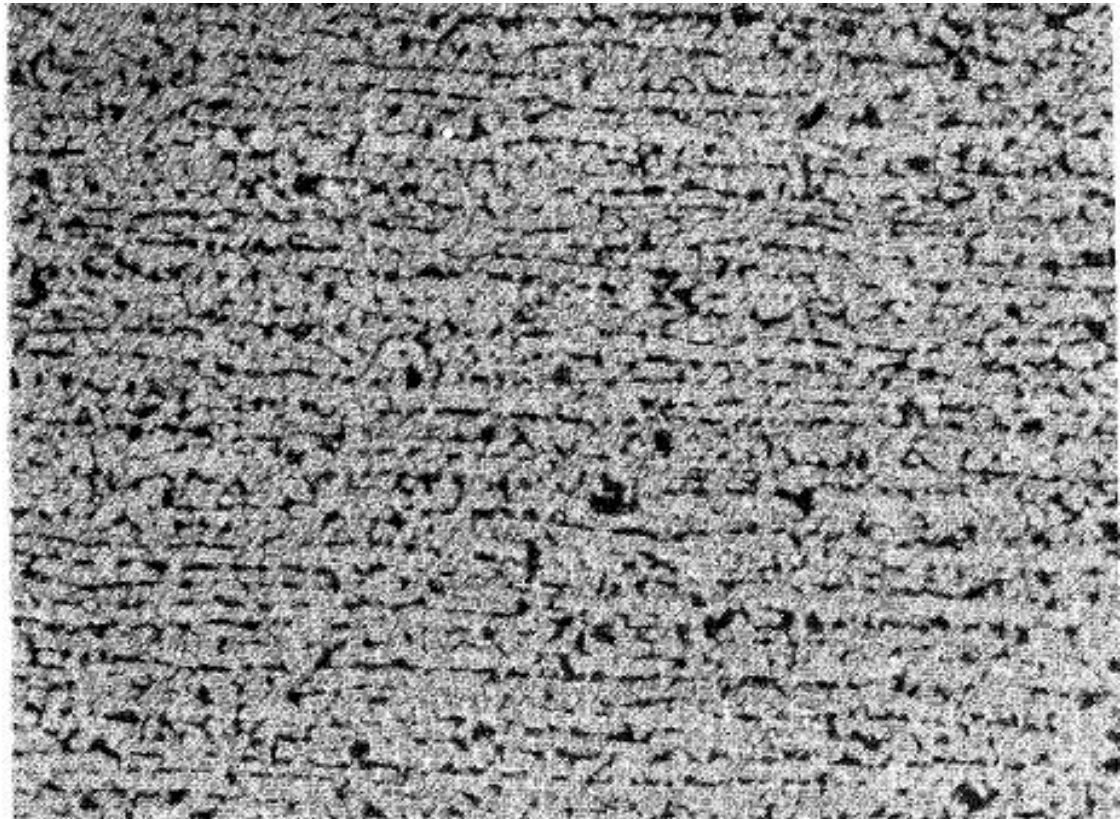
Operaciones de conformado

Piezas de acero forjadas



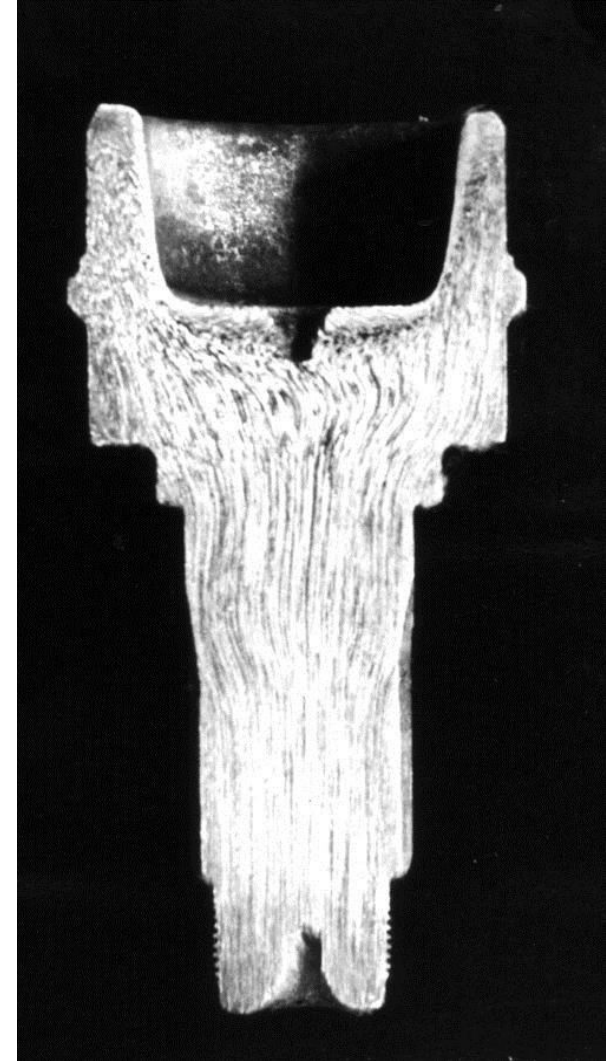
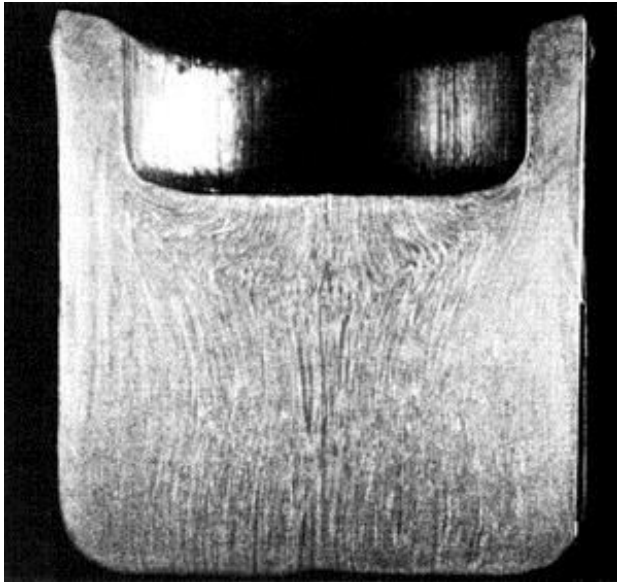
Microestructura

- Durante la deformación en caliente se cierran los poros y las partículas de segundas fases e inclusiones se distorsionan en la dirección de la deformación si son mas dúctiles que la matriz y se fragmentan y alinean en la dirección de trabajado si son mas frágiles que la matriz.
- La orientación de partículas de segunda fase y de la fragmentación de los granos da **una estructura de fibras** típica de los productos forjados.
- Esta estructura de fibras tiene consecuencias en las propiedades mecánicas de la pieza, estas dependerán de la dirección con respecto a las fibras.
- En general **la tensión de fluencia, la resistencia a la fatiga y al impacto** son peores en dirección transversal a las fibras, esto tiene consecuencias en el diseño de los procesos de deformación.



Estructura de fibras y bandas en placa de acero de medio carbono laminada en caliente (X100)

Estructura de fibras y bandas

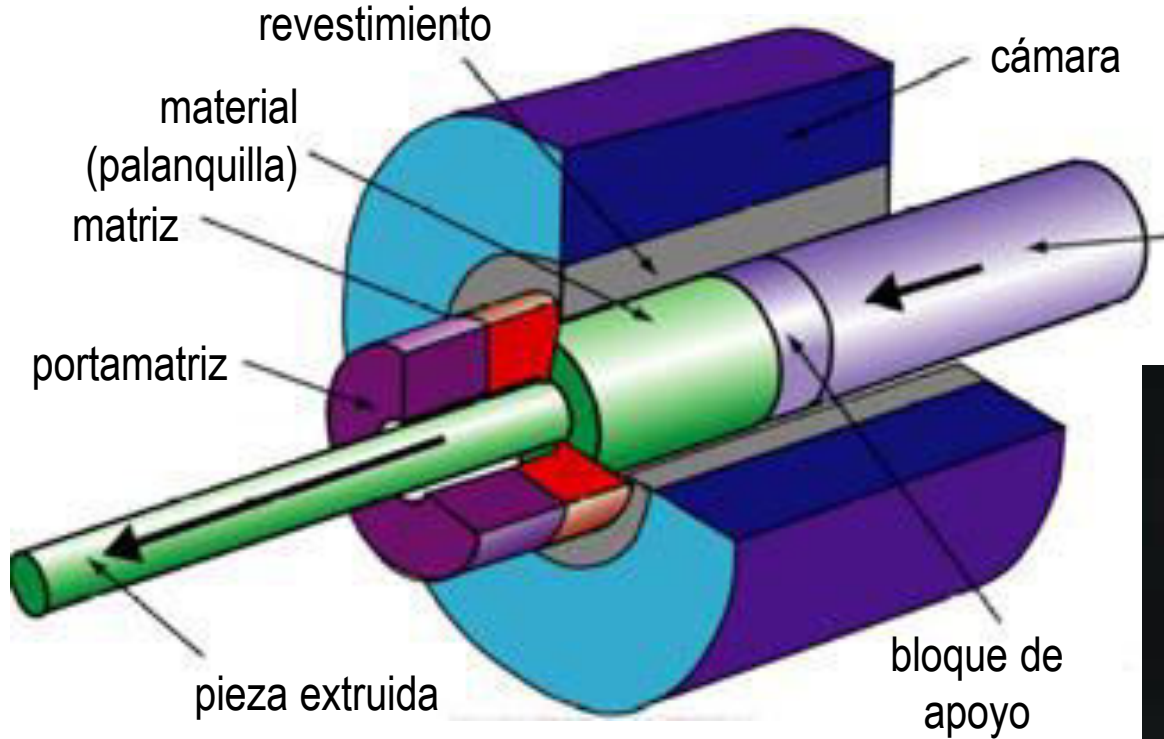


Estructura de fibras y bandas en piezas de acero forjado



Prensa de forjado Schuler
fuerza de prensado nominal: 10.000 kN

Operaciones de conformado



Extrusión directa

vástago de la prensa

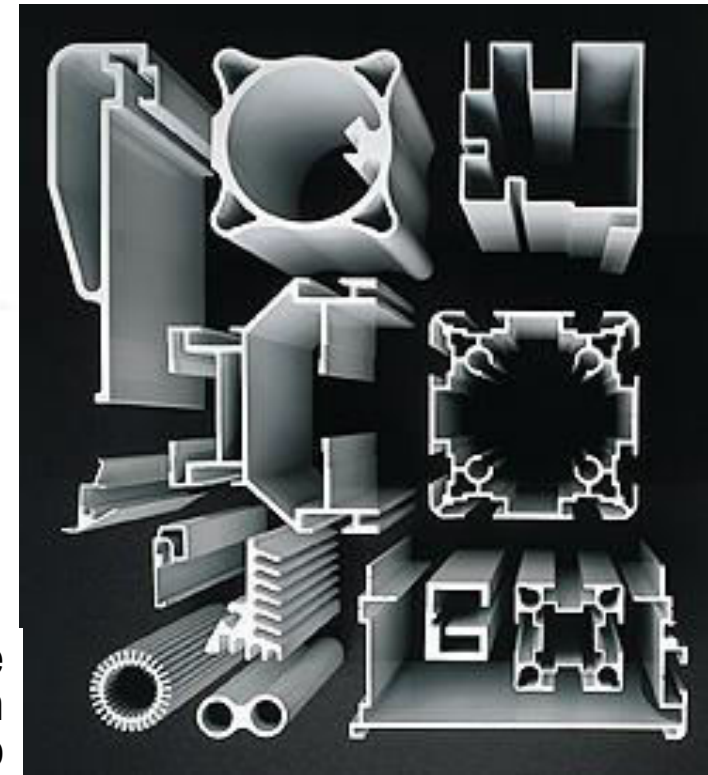
Temperaturas de extrusión (° C):

Aluminio: 350-500

Cobre: 600-1100

Acero: 1200-1300

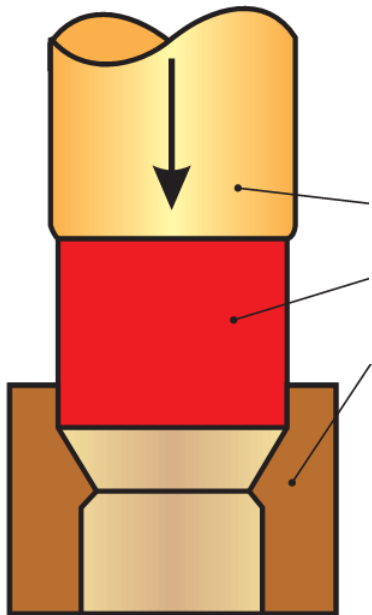
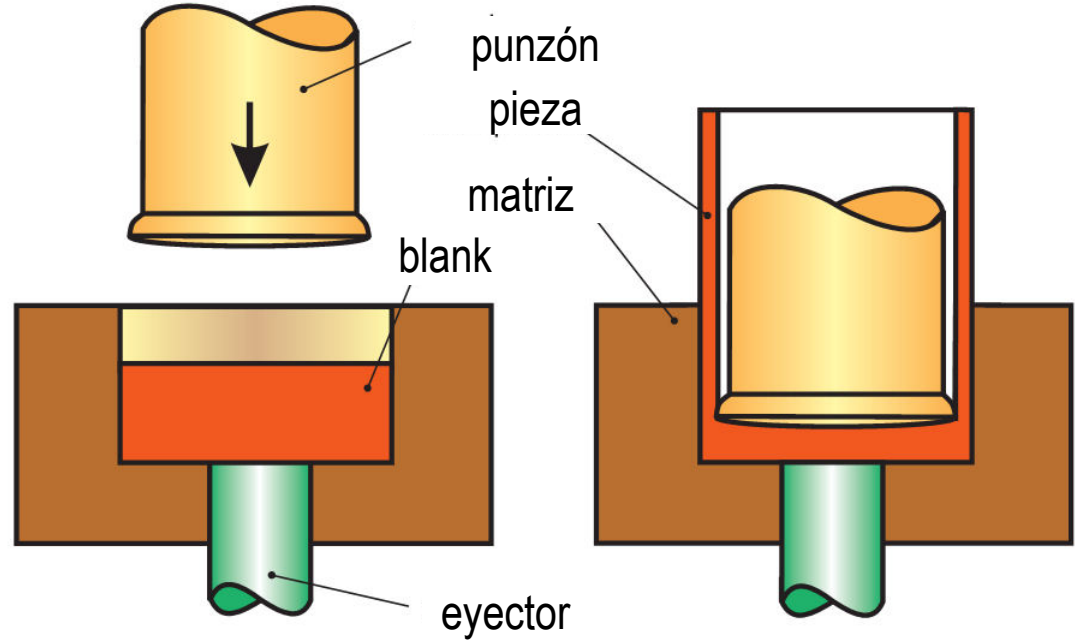
Magnesio: 350-450



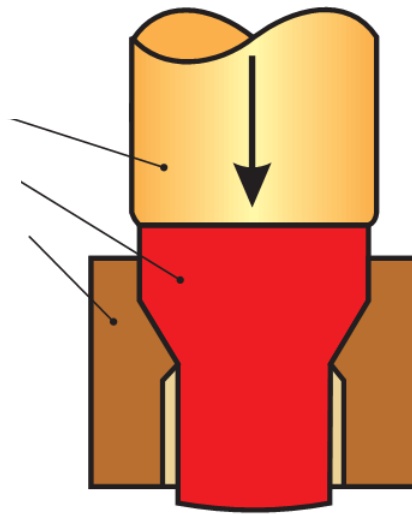
Perfiles de extrusión en aluminio

Operaciones de conformado

Extrusión inversa o por impacto

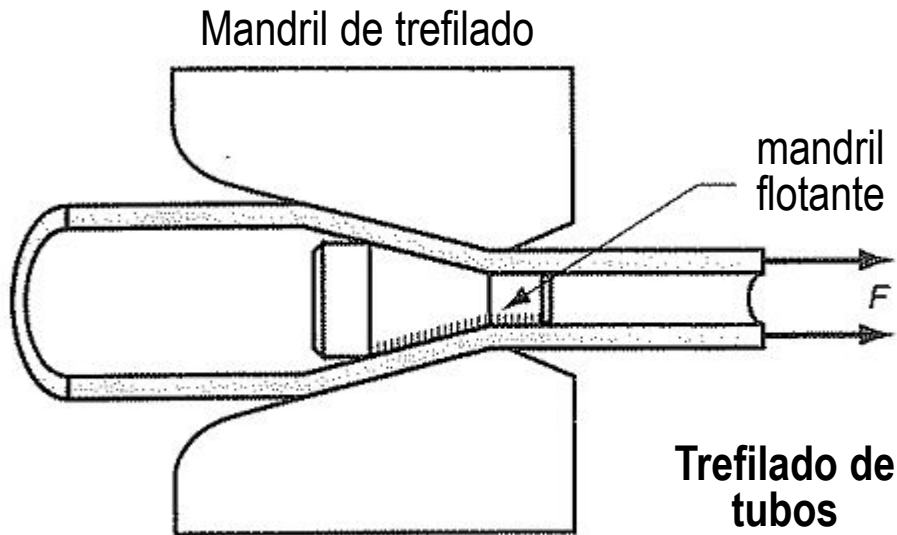
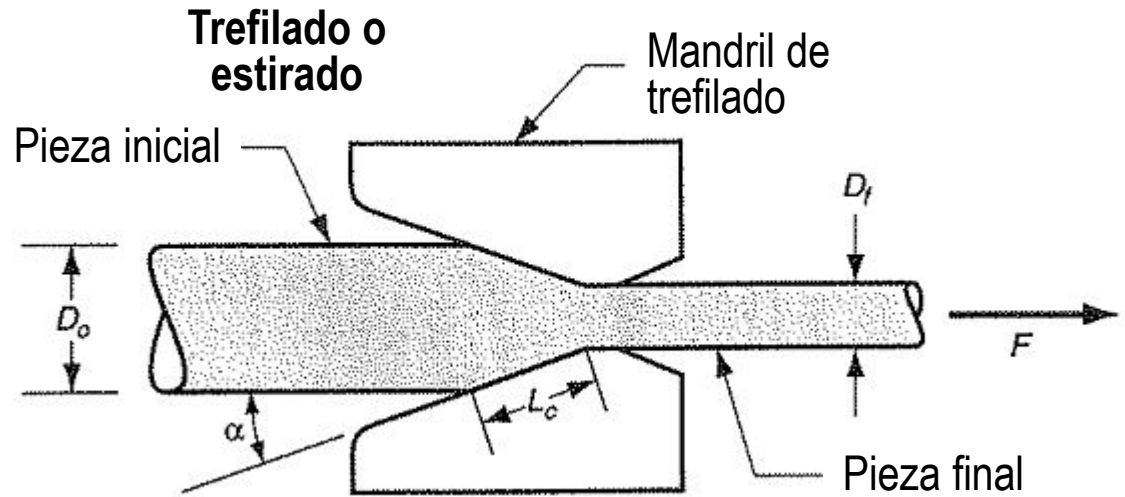


punzón
pieza
matriz



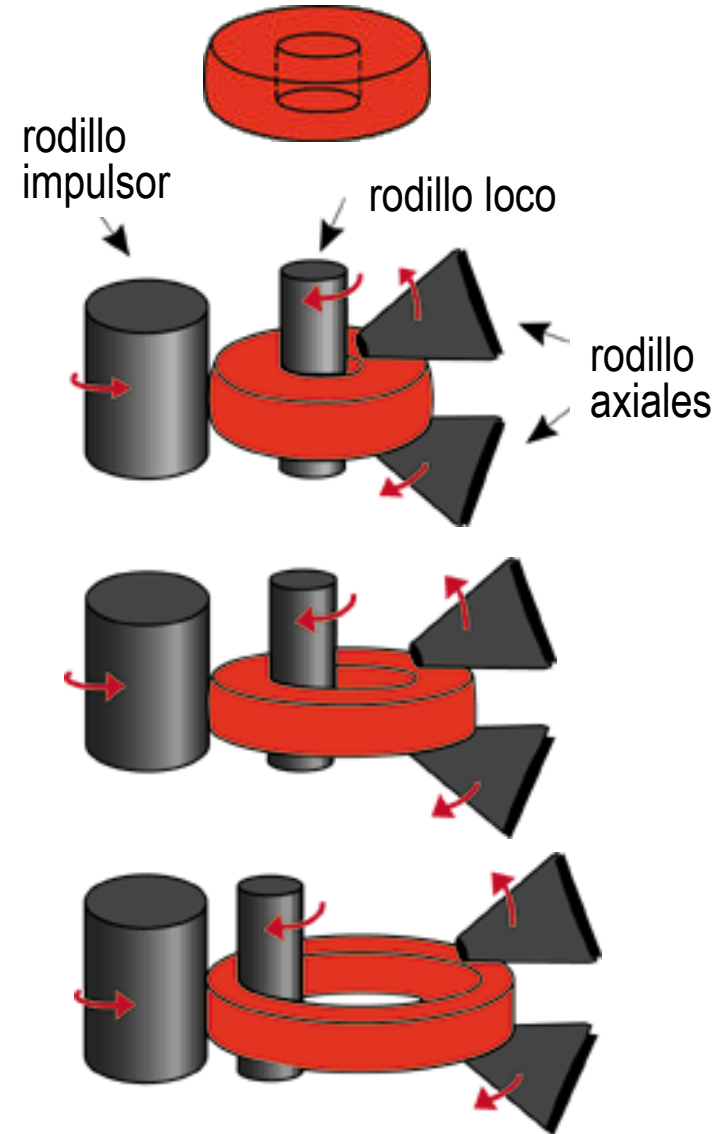
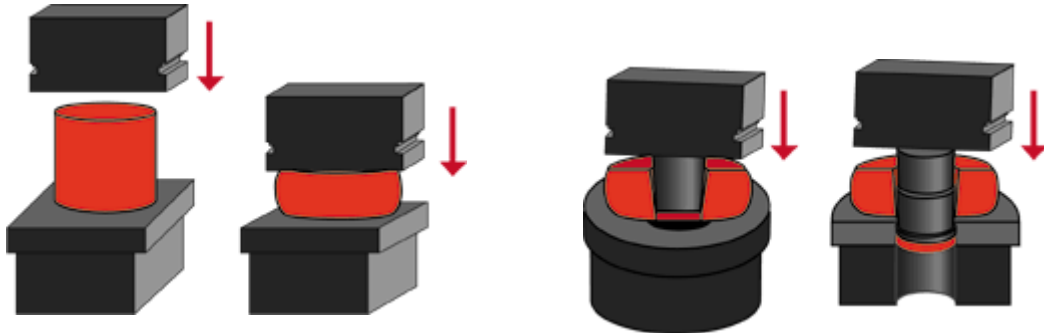
Extrusión libre

Operaciones de conformado



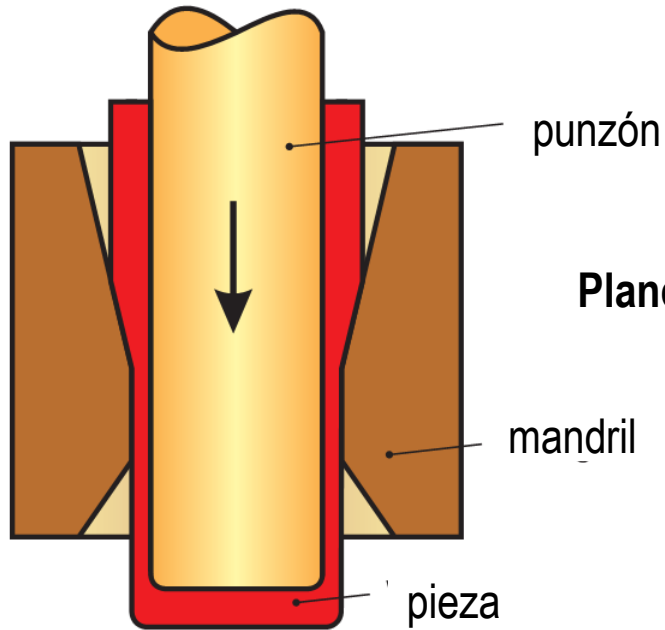
Alambre de acero trefilado

Operaciones de conformado

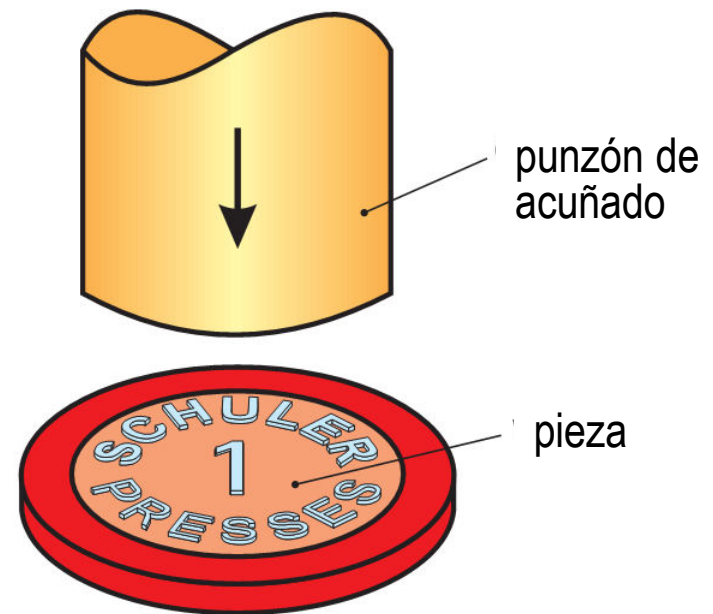


Laminación de anillos

Operaciones de conformado

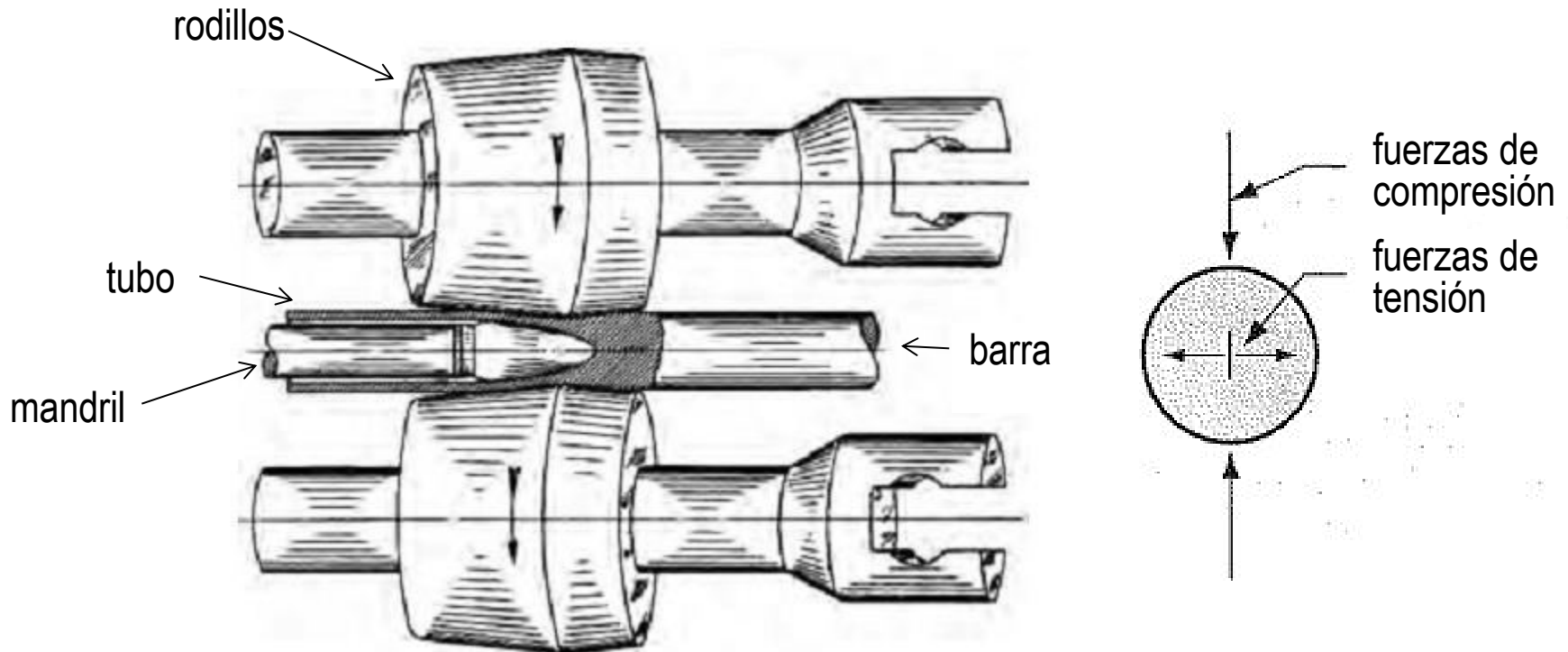


Planchado



Acuñado

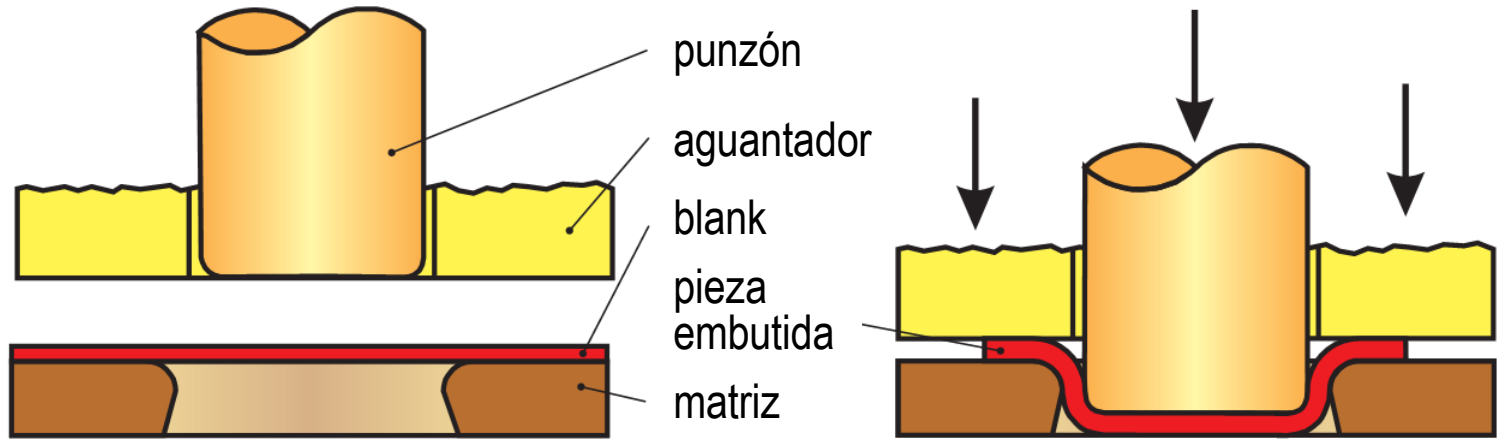
Operaciones de conformado



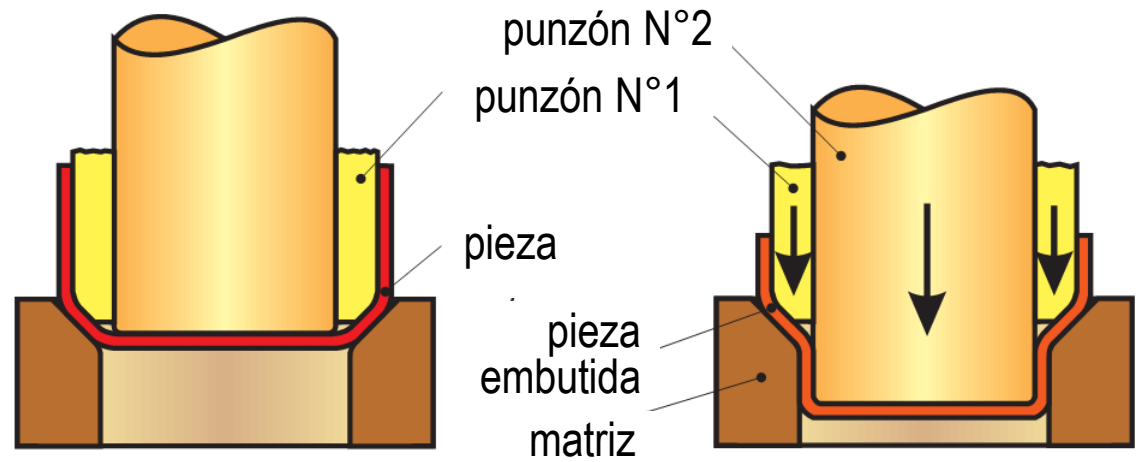
Laminación de tubos sin costura (Mannesman)

Operaciones de conformado

Embutido profundo

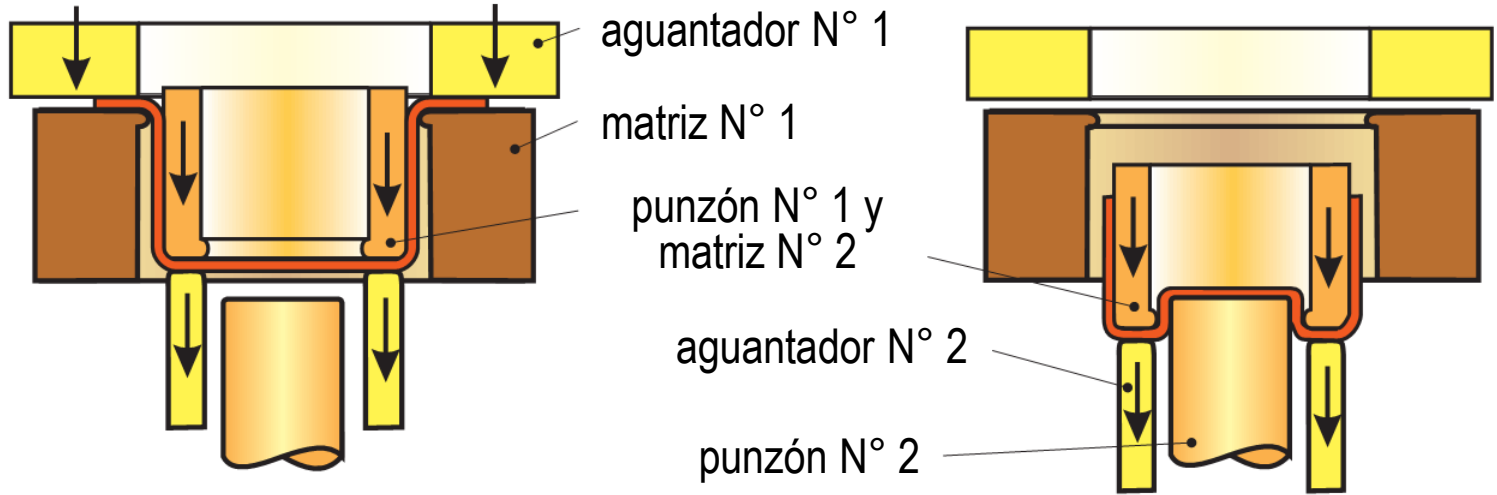


Embutido profundo múltiple

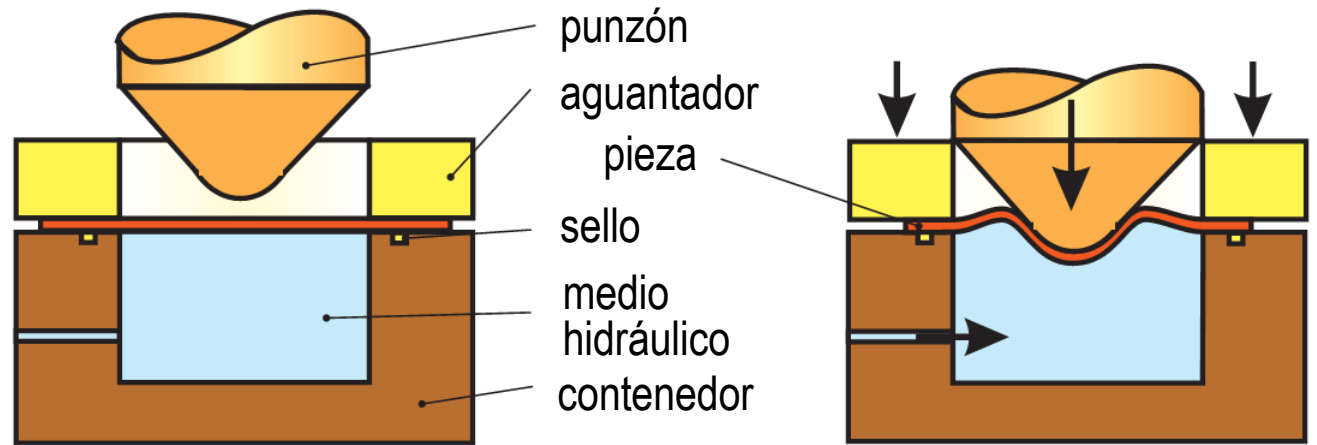


Operaciones de conformado

Embutido profundo inverso

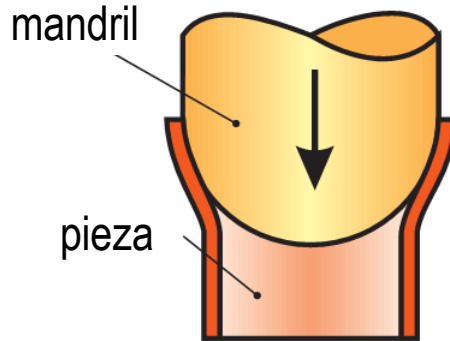
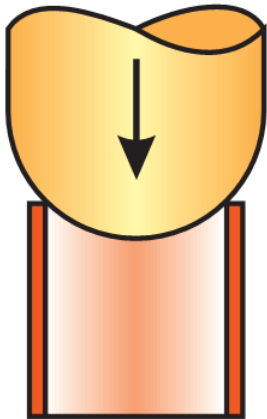
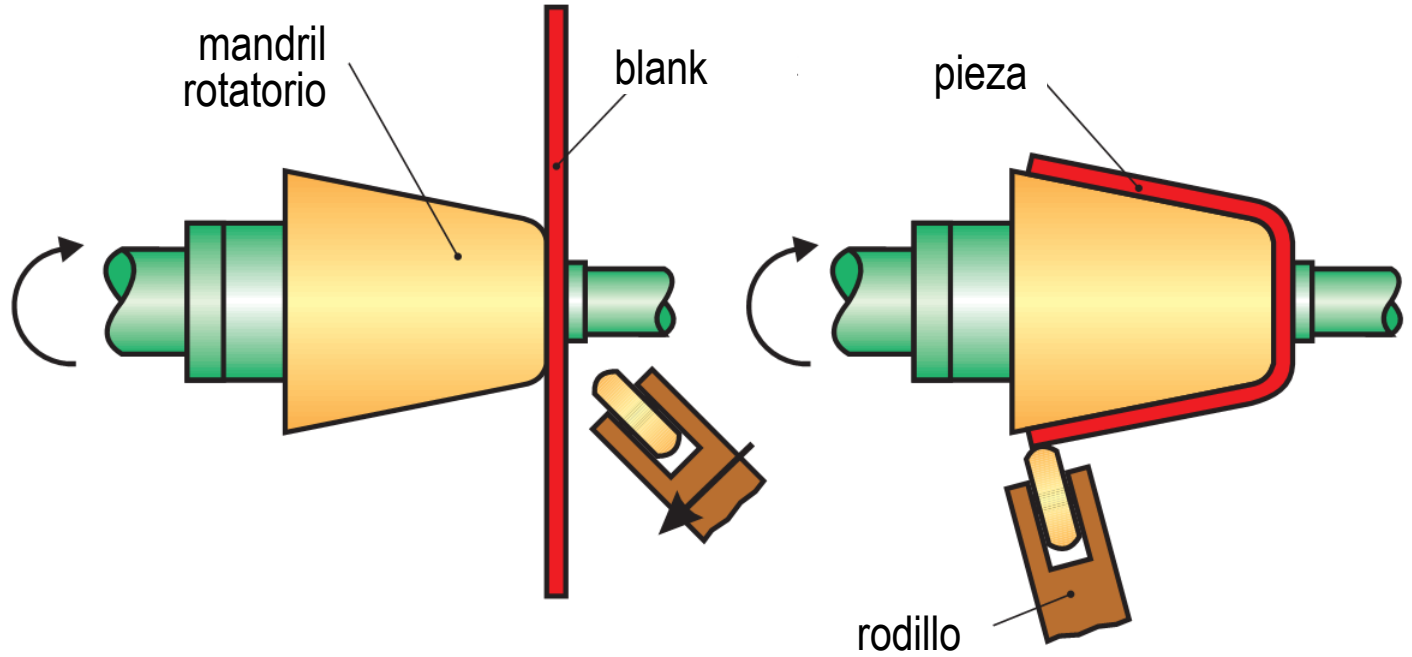


Embutido profundo hidromecánico



Operaciones de conformado

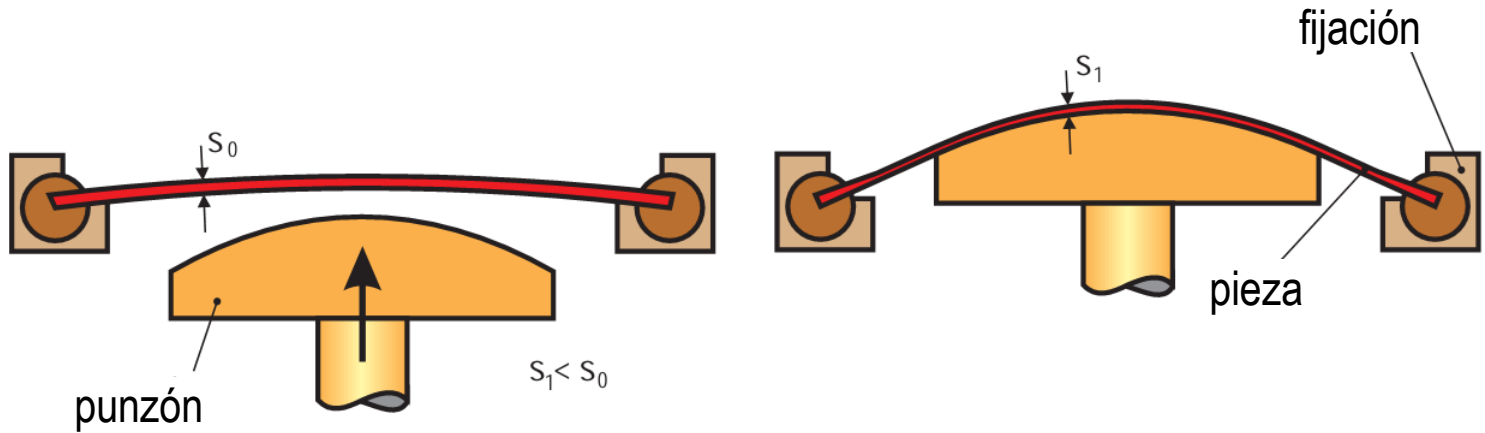
Spinning



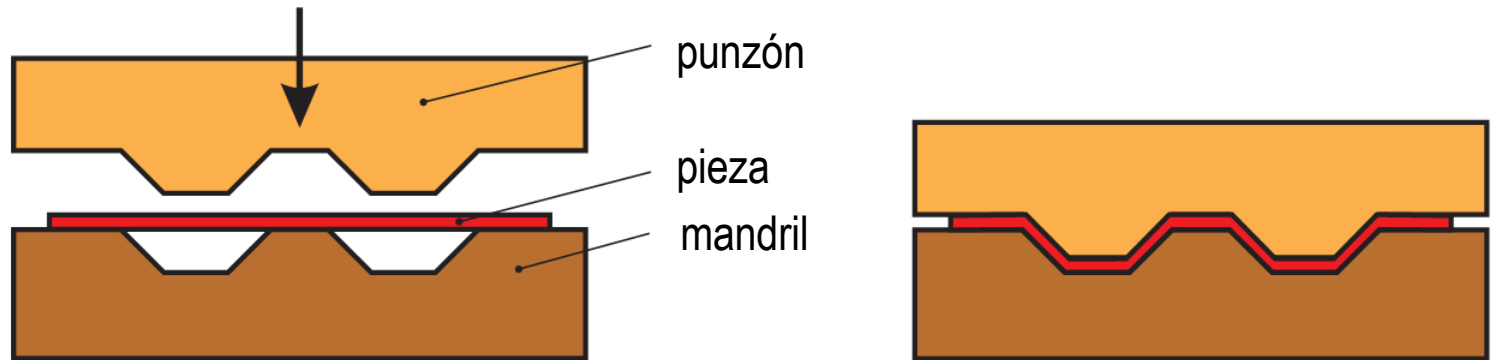
Expandido de tubos

Operaciones de conformado

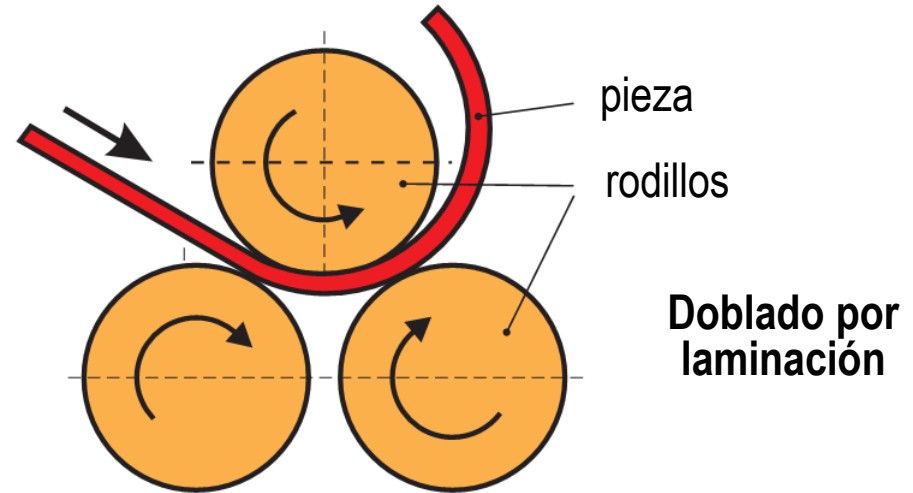
Estirado



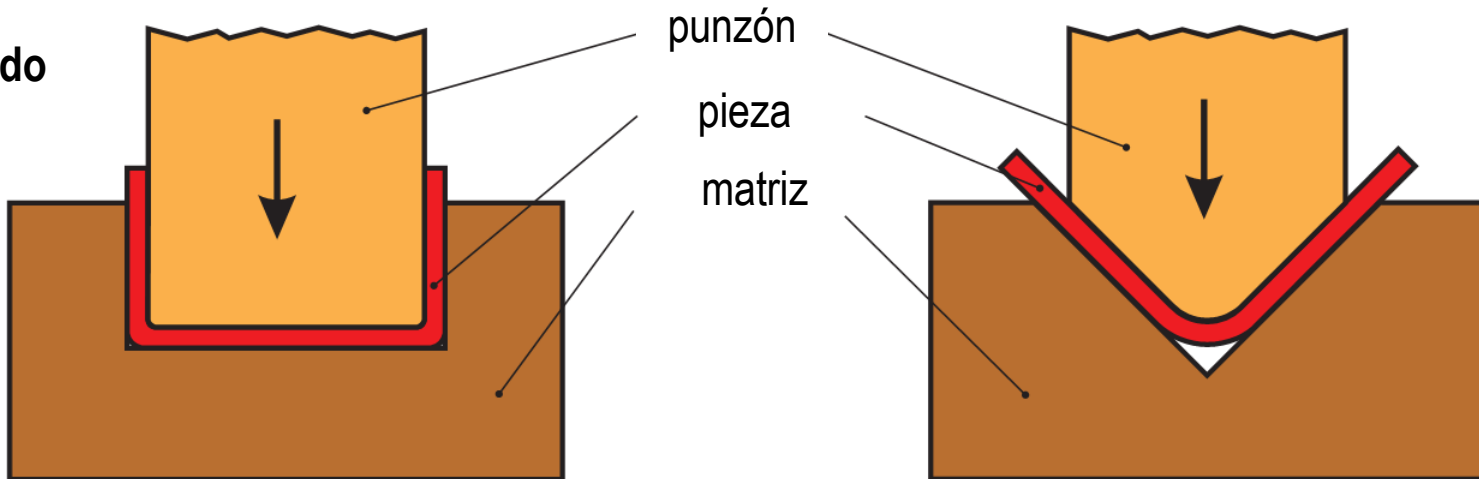
Estampado



Operaciones de conformado

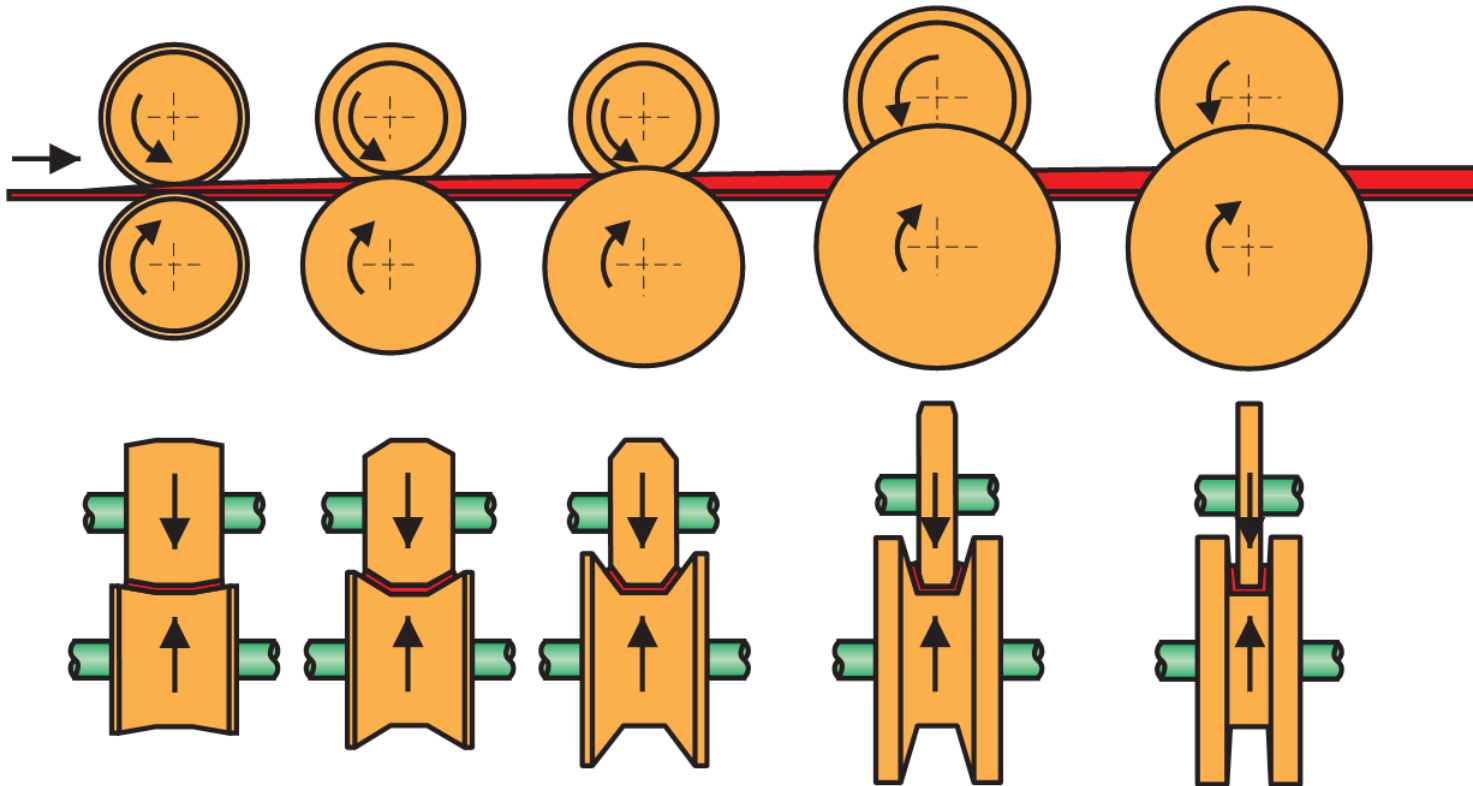


Doblado



Operaciones de conformado

Conformado por laminación



Operaciones de conformado



Conformado por laminación

Operaciones de conformado

