

PROCESOS DE LAMINACIÓN Y ROLADO



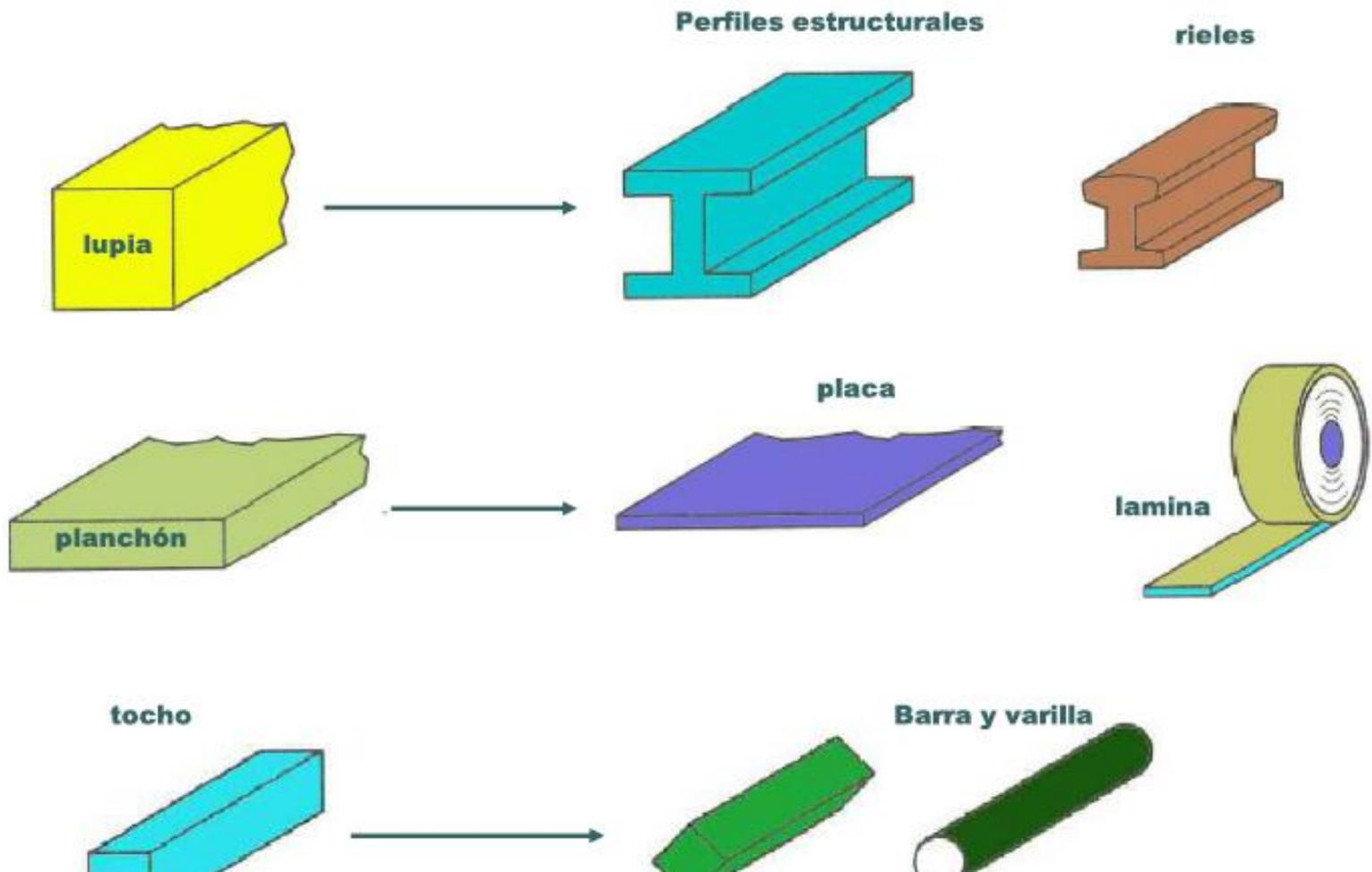
PROCESO DE LAMINADO

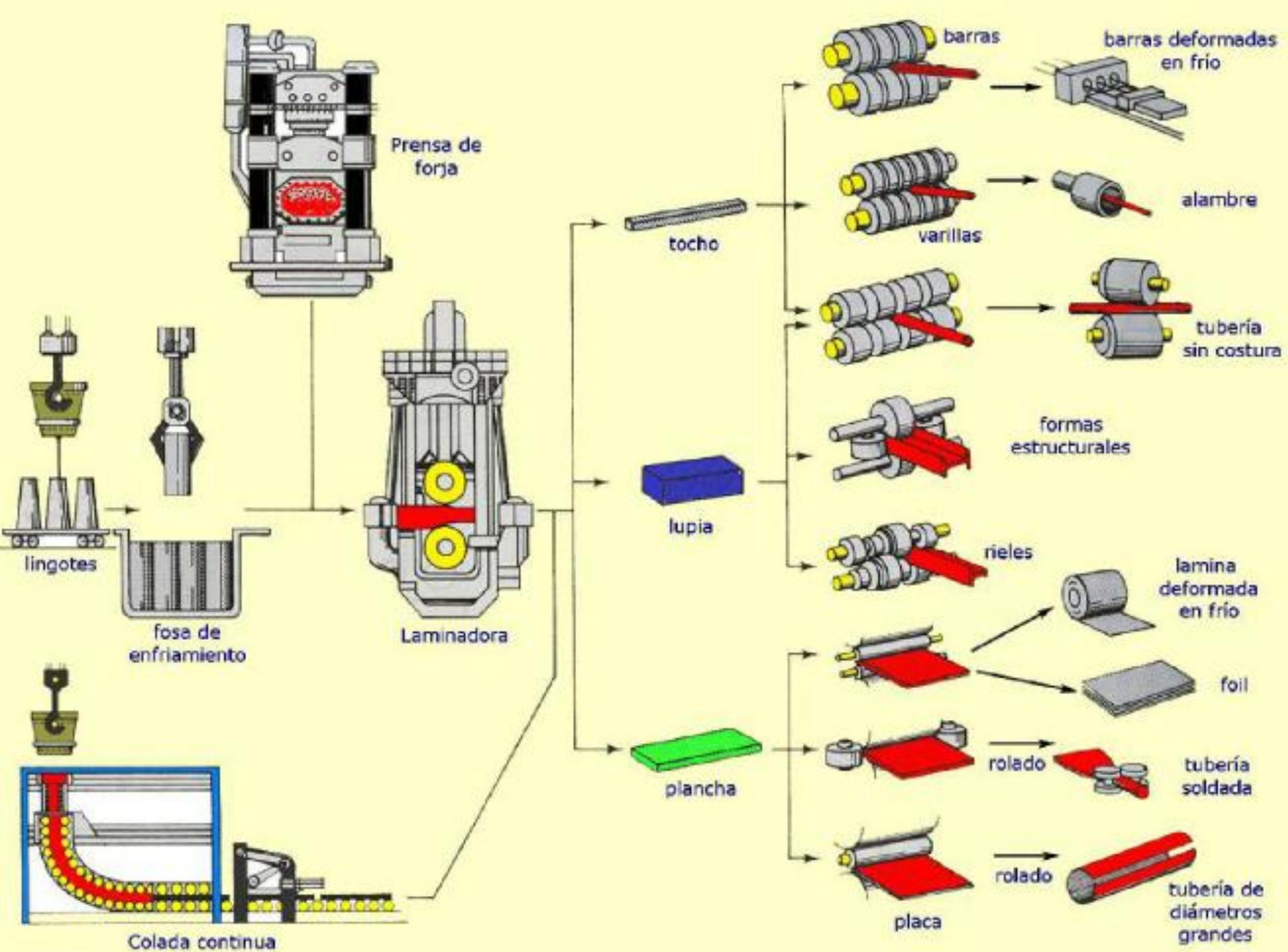
Los aceros laminados –también denominados aceros estructurales–, generalmente utilizados para la construcción de estructuras metálicas, son derivados de aleaciones del hierro y carbono.

Se producen a partir del arrabio (o hierro en bruto obtenido por la reducción del mineral de hierro en hornos altos) al que se le somete a una serie de tratamientos físico-químicos que le modifican tanto su composición química, como sus propiedades físicas, obteniéndose así diferentes calidades de aceros.

A partir de estos, por laminación (ya sea en caliente o en frío), se producen piezas en forma de prisma de sección transversal uniforme, cuya sección puede adoptar diferentes perfiles, desde el simple perfil rectangular (chapas y pletinas) hasta secciones elaboradas en forma de I, de H, de U, de T , angulares, doble T, etc.

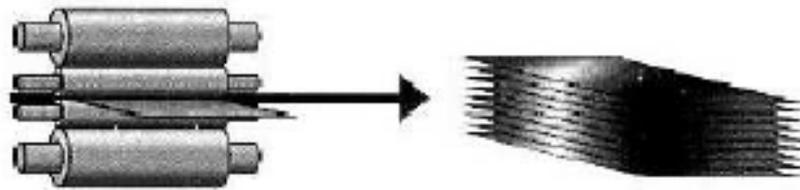
PRODUCTOS OBTENIDOS POR LAMINACIÓN Y ROLADO





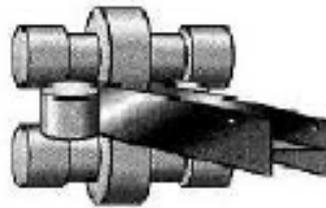
DEFORMACIÓN VOLUMETRICA (MASA)

Deformación del
planchón



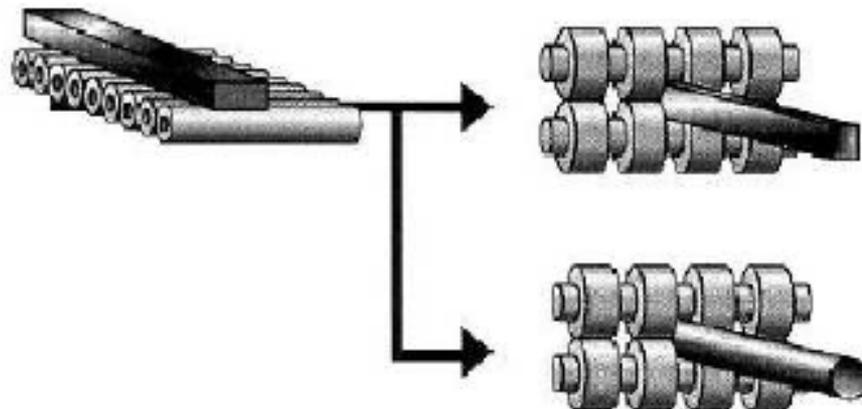
placa

Deformación de la
lupia



perfiles
estructurales

Deformación del
tocho



Barras

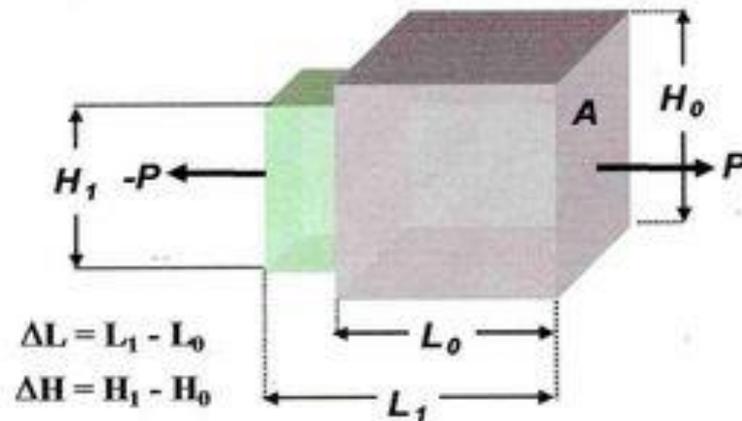
Y

varillas

ESFUERZOS DE TRACCIÓN

Sometido un cuerpo cualquiera a un esfuerzo (P), llamaremos sección transversal (A) al esfuerzo, a la sección de la pieza, normal al vector fuerza P – es decir, a la dirección de ese esfuerzo–.

El cociente $\sigma = P/A$, se denomina tensión a la que sometemos a la sección considerada.



El esfuerzo σ provocado por la fuerza P , producirá una deformación absoluta del cuerpo en cuestión (ΔL) en la dirección de la aplicación de la fuerza. Con respecto a su dimensión inicial L_0 , el alargamiento unitario vendrá definido como:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

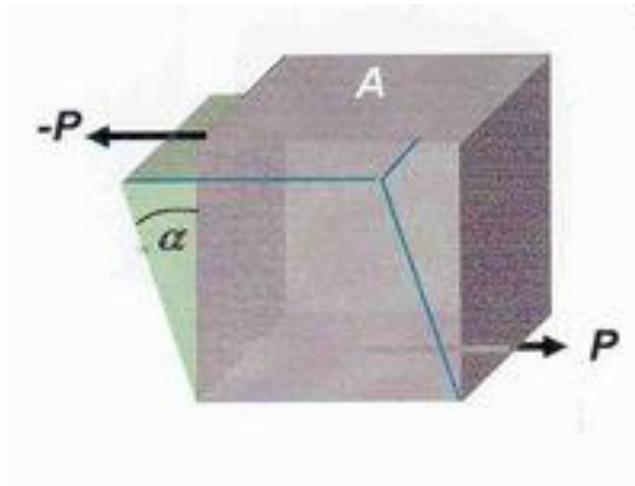
La deformación en el sentido de la fuerza aplicada, no sólo modifica la dimensión en la dirección de esta fuerza (en el caso de la Figura 1, alargamiento), sino que también deforma al cuerpo en las direcciones perpendiculares y en el sentido contrario a estas (en el caso de la figura 1, se tratará de un encogimiento de estas dimensiones).

El aumento de longitud en el sentido perpendicular al de la fuerza aplicada será ($\Delta H'$).

La variación relativa, respecto de la dimensión inicial H_0 , será $\epsilon_H = \frac{\Delta H}{H_0}$

La relación entre las dos variaciones dimensionales como consecuencia de la aplicación de la fuerza P , se denomina módulo de Poisson: $\mu = - \frac{\Delta H}{\Delta L}$

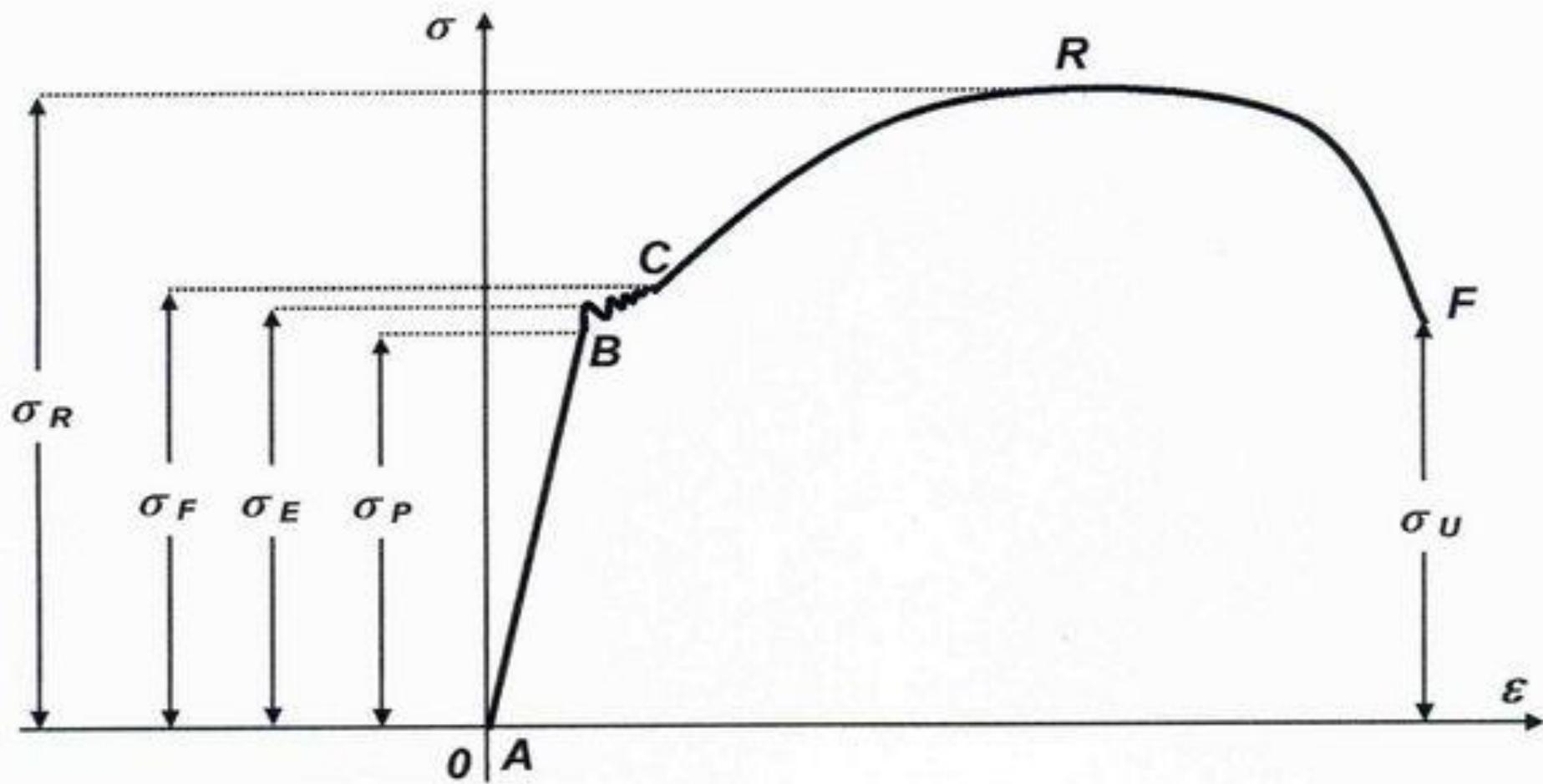
Si sobre un cuerpo la fuerza se aplica de manera tangente, su deformación se efectúa de la manera que se esquematiza en la figura adjunta.



Se dice que la fuerza es una fuerza cortante pura.

La deformación producida viene caracterizada por el ángulo α , tal y como se esquematiza en la figura.

La tensión se simboliza por la letra τ , y vale: $\tau = \frac{P}{A}$



LA LEY DE HOOKE

Los aceros usados para la obtención de piezas laminadas presentan, ante tensiones de extensión (o compresión) inferiores a un cierto valor σ_P , una proporcionalidad entre las tensiones (σ) y los alargamientos unitarios (ϵ).

La constante de proporcionalidad entre ambos parámetros se denomina módulo de elasticidad o también módulo de Young, y suele representarse por la letra E . De manera algebraica, esta proporcionalidad se expresará como: $\sigma = E \cdot \epsilon$.

Esta ley supone que si la tensión desaparece, la forma del objeto retorna exactamente a la original, o bien, si esta tensión se reduce a la mitad, la deformación (alargamiento o retracción) se reduce igualmente exactamente a la mitad. Es decir, en ella no se contempla ningún fenómeno de histéresis.

De la definición del módulo de Poisson (μ) se deduce: $\epsilon_1 = \mu \cdot \epsilon_0$, es decir: $\epsilon_1 = \mu \cdot$

En el caso de fuerzas cortantes sobre cuerpos elásticos de Hooke, la ley se expresa como:

$$\tau = G \cdot \alpha$$

Donde la constante de proporcionalidad (G) entre deformaciones angulares y tensiones se denomina módulo de elasticidad transversal o módulo de tensión cortante. Esta constante o módulo no es independiente del de Young, sino que está relacionado con él según la relación:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

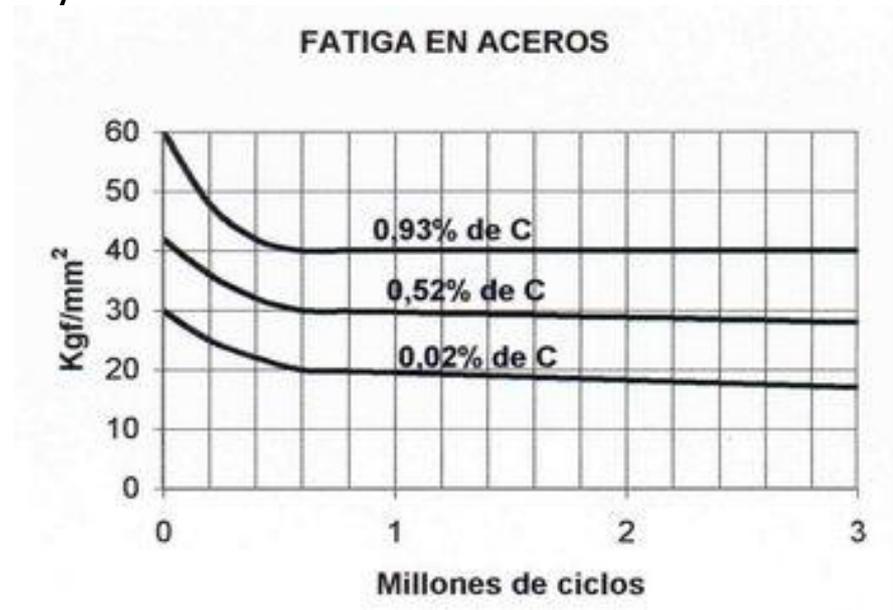
Las características mecánicas de los aceros, quedan definidas frecuentemente por ensayos mecánicos, entre los que se destacan los siguientes:

ENSAYO DE TRACCIÓN

Se realiza sobre probetas generalmente cilíndricas, que sujetas por sus extremos mediante mordazas, en máquinas especiales de ensayo homologadas, son sometidas a un proceso de tracción pura, hasta rotura. Se miden, de manera continua y simultánea las fuerzas de tracción y los alargamientos producidos.

ENSAYO DE FATIGA

El término fatiga se refiere a la disminución de resistencia mecánica de los aceros por la acción de esfuerzos cíclicos. En las pruebas de fatiga, se somete una probeta a esfuerzos que varían periódicamente de valores positivos a negativos, según diferentes frecuencias. Tras la prueba, se somete a la probeta a un ensayo de resistencia a tracción hasta rotura.



LAS SIGUIENTES CARACTERÍSTICAS SON CONSIDERADAS COMO LAS MÁS COMUNES A TEMPERATURA AMBIENTE, A EFECTOS DEL CÁLCULO DE ESTRUCTURAS EN ACERO LAMINADO:

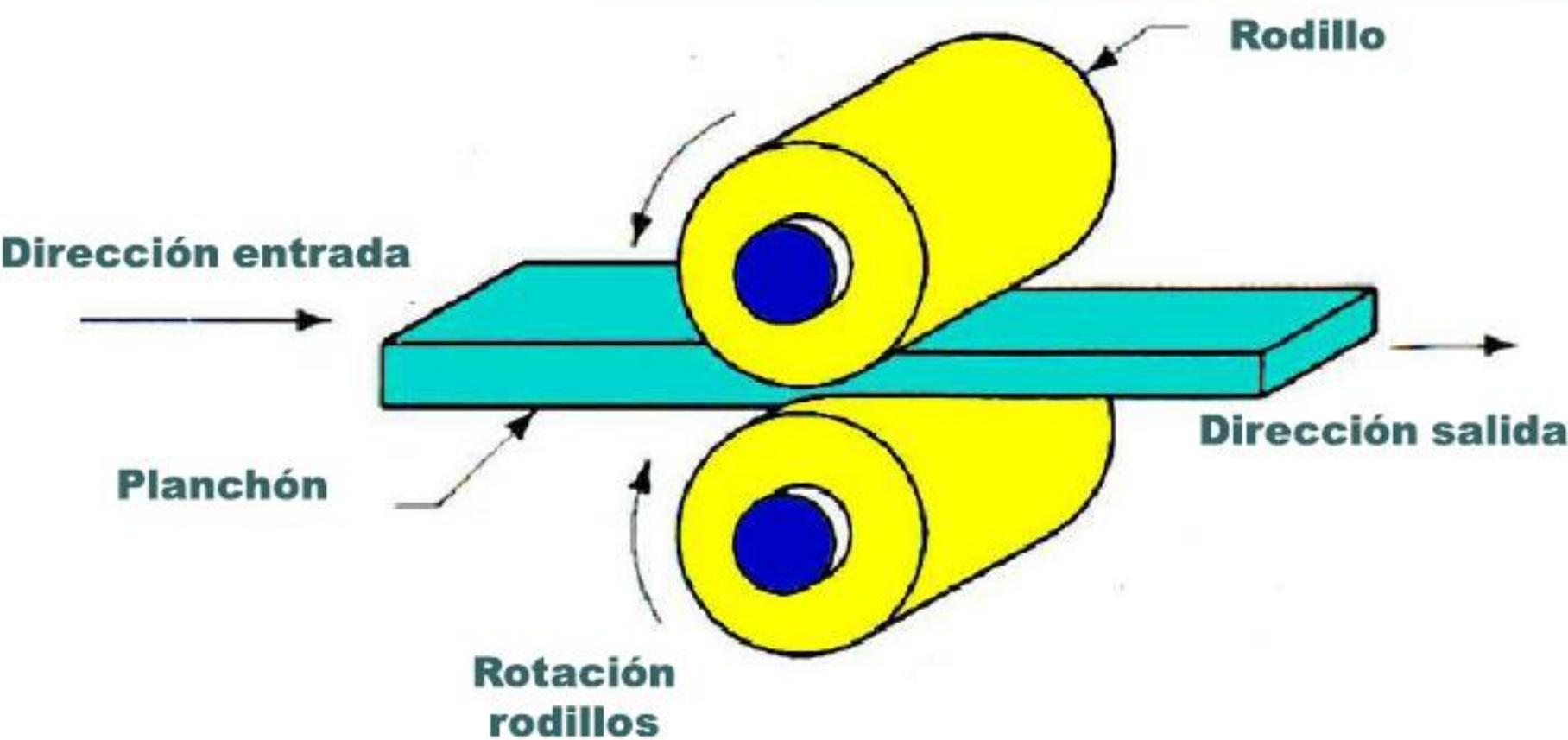
Módulo de elasticidad (o de Young), $E = 210.000 \text{ N / mm}^2$

Módulo de Poisson, $\mu = 0,3$ (adimensional)

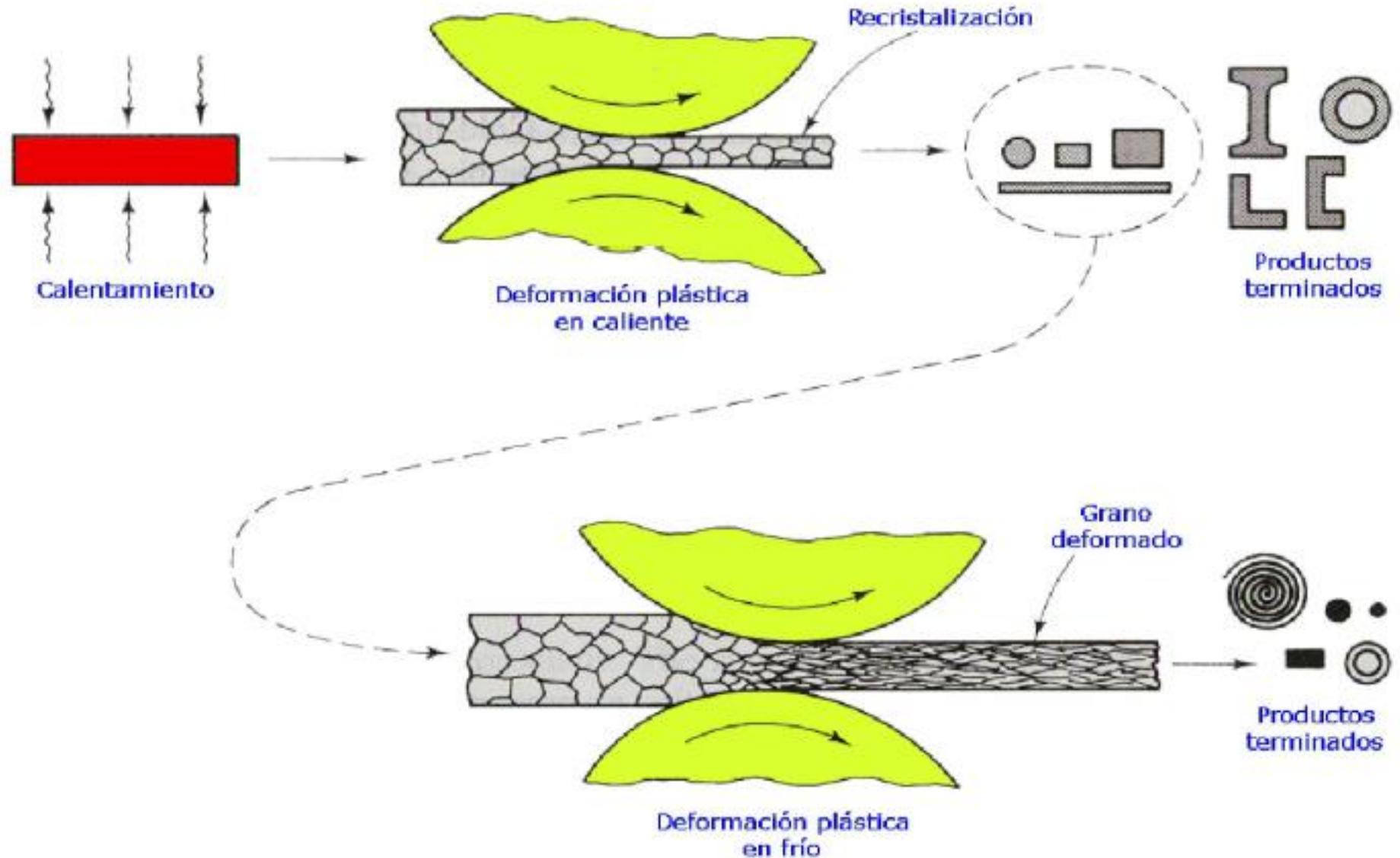
Módulo de rigidez, $G = 81.000 \text{ N / mm}^2$

Coefficiente lineal de dilatación térmica, $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Densidad, $\rho = 7,850 \text{ Kg / m}^3$



Laminación en caliente vs. Laminación en frío

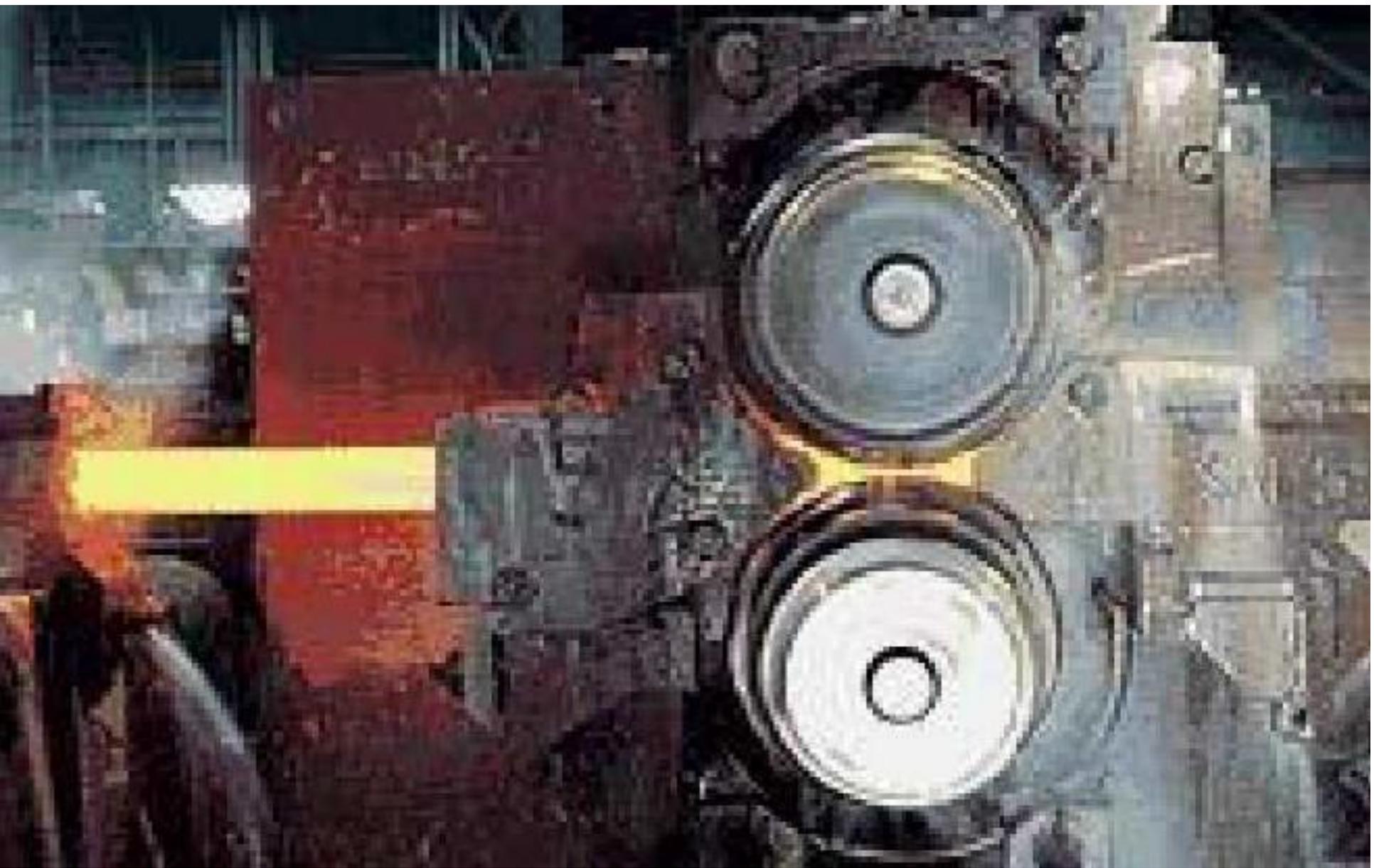


TEMPERATURAS DE RECRISTALIZACIÓN

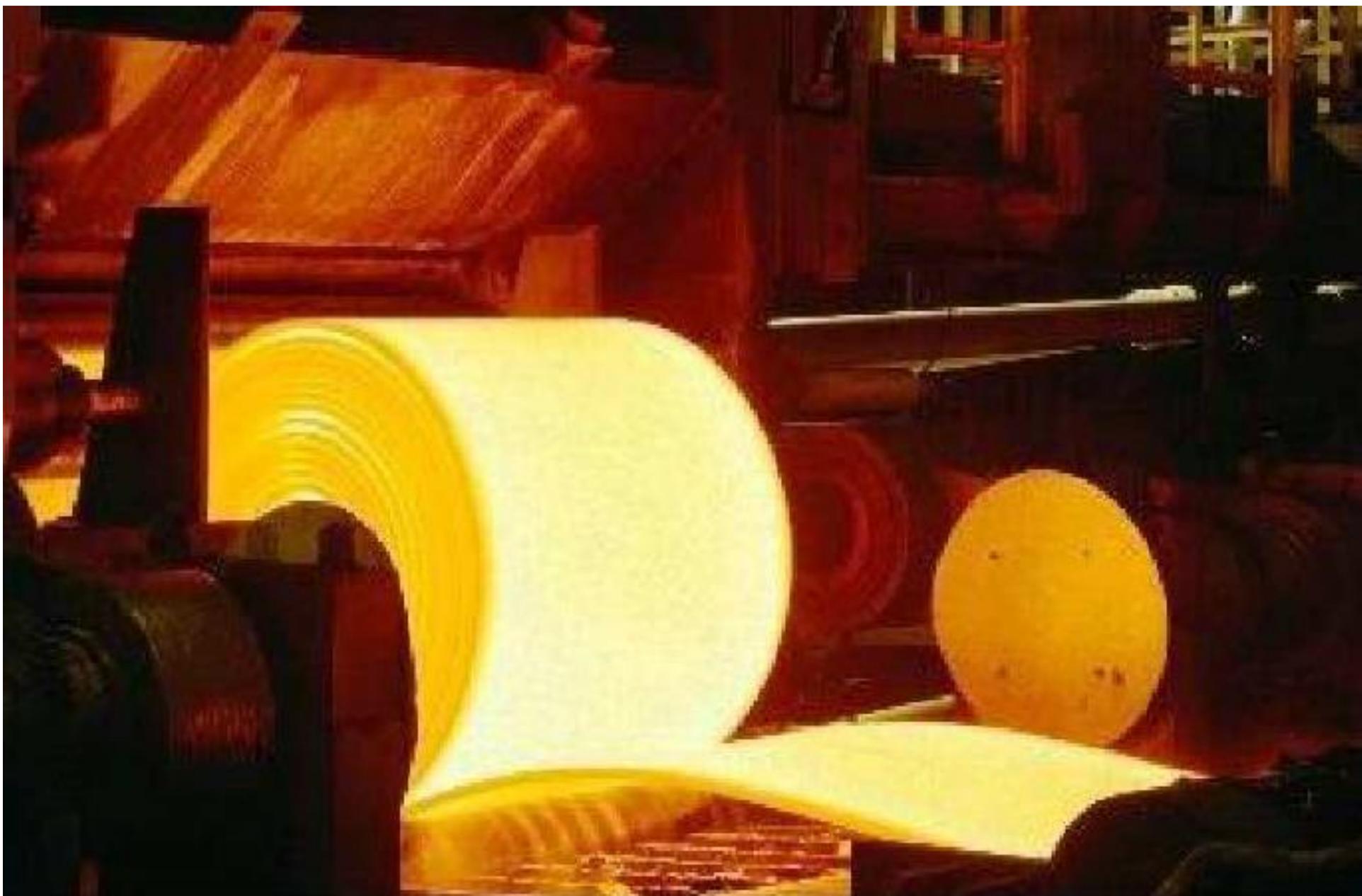
METAL	TEMPERATURA DE FUSIÓN °C	TEMPERATURA DE RECRISTALIZACIÓN °C
Sn	232	- 4
Pb	327	- 4
Zn	420	10
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200



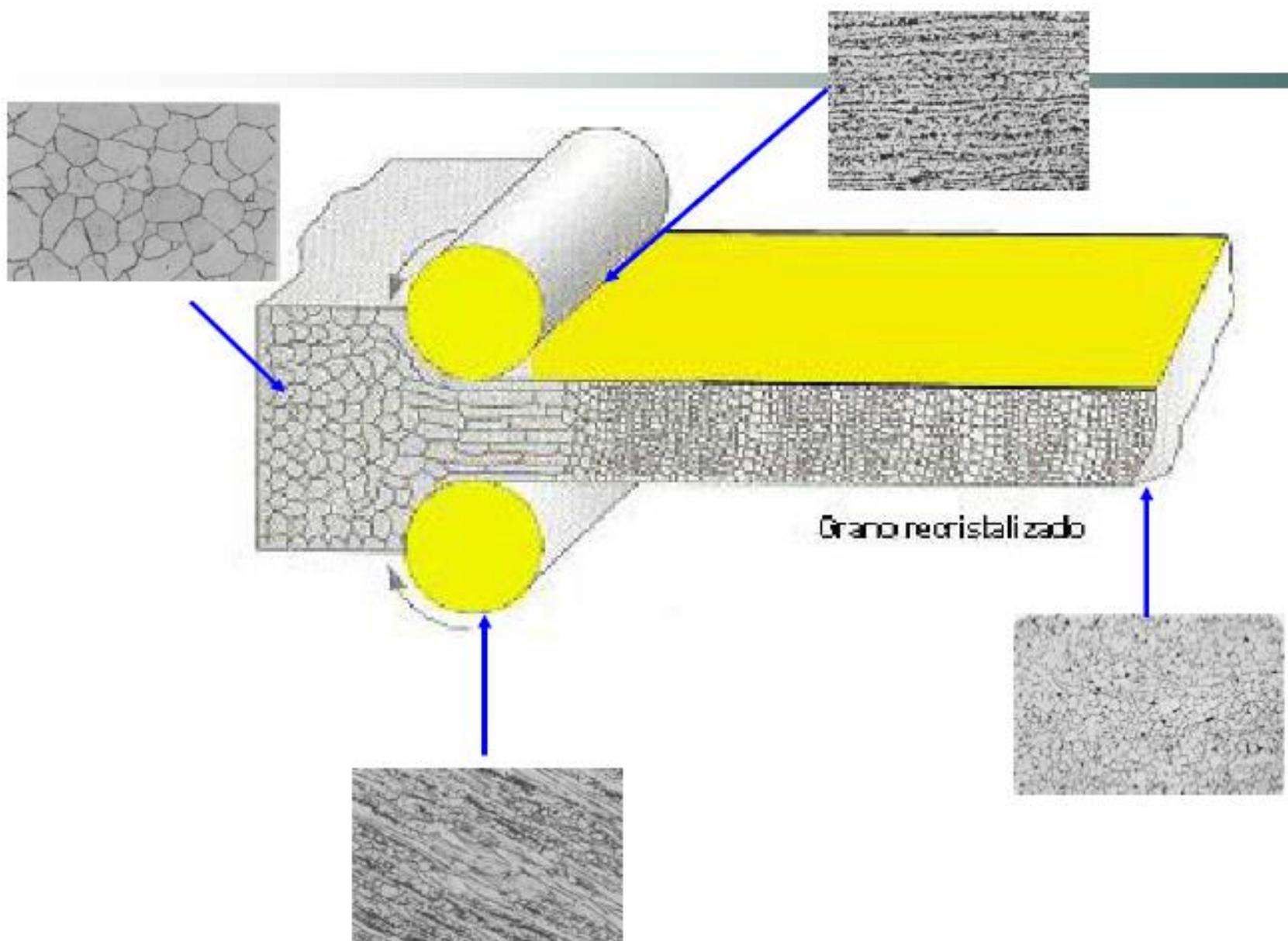


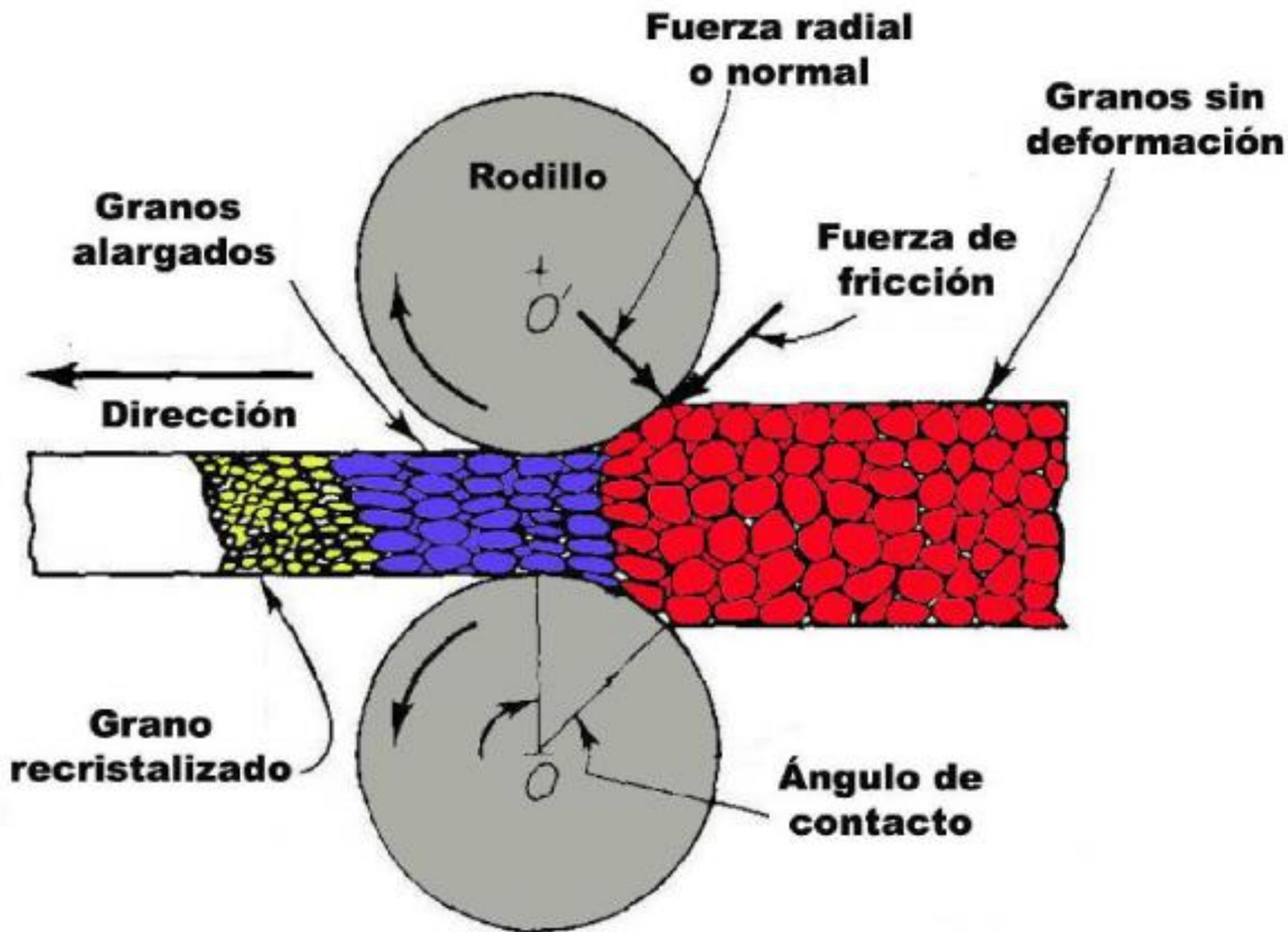






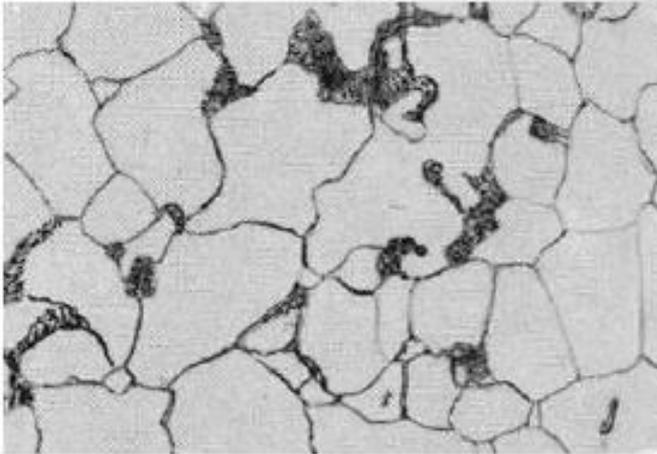
CAMBIOS MICROESTRUCTURALES DURANTE LA DEFORMACIÓN EN CALIENTE



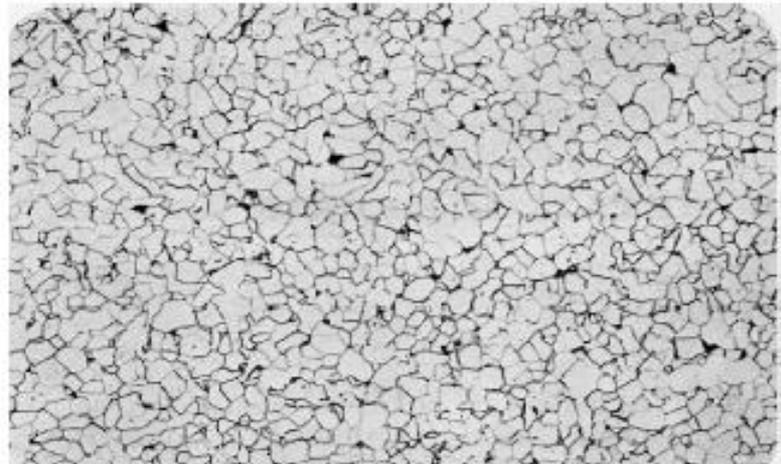
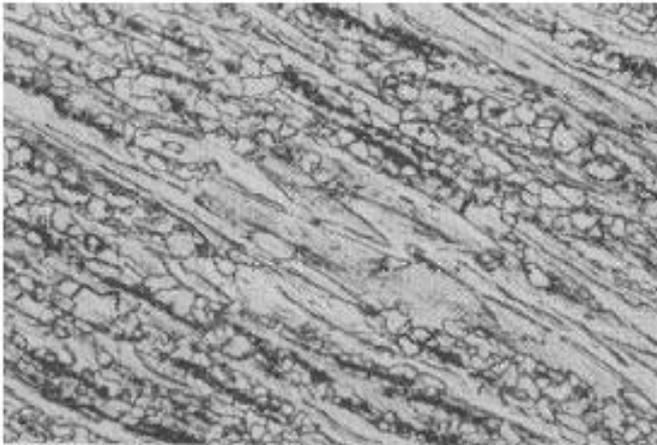
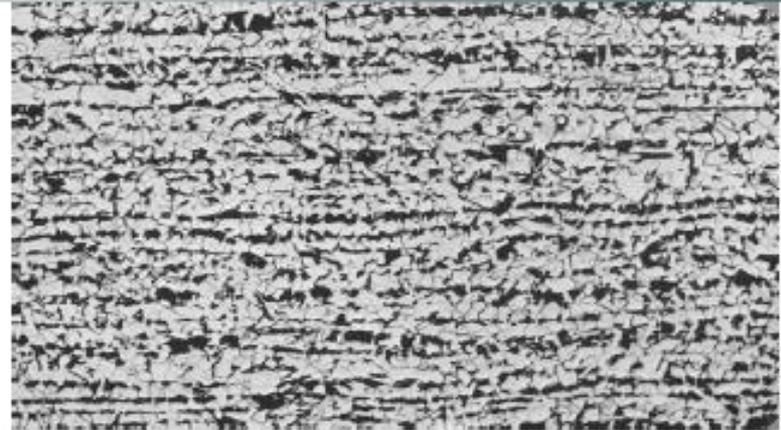


EVOLUCIÓN DE LA MICROESTRUCTURA

Granos sin deformación

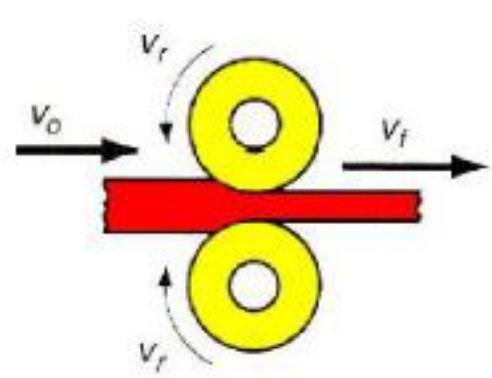


Granos con deformación

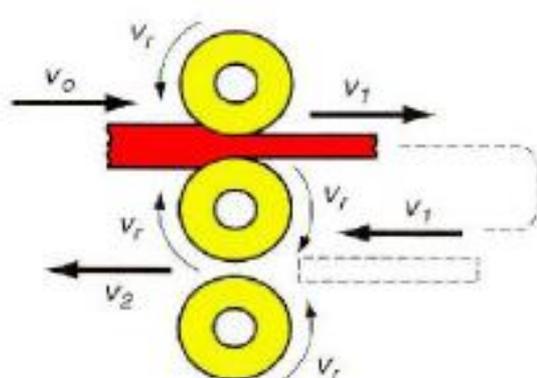


**Granos parcialmente
recristalizados**

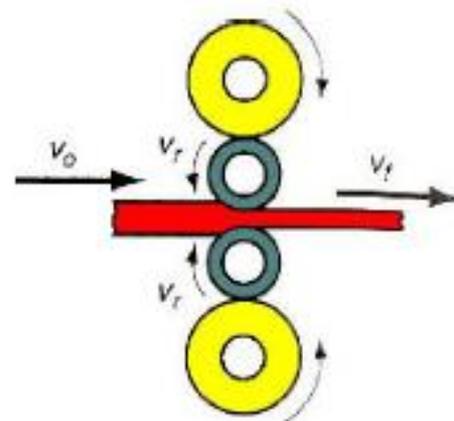
**Granos sin deformación
(recristalizado)**



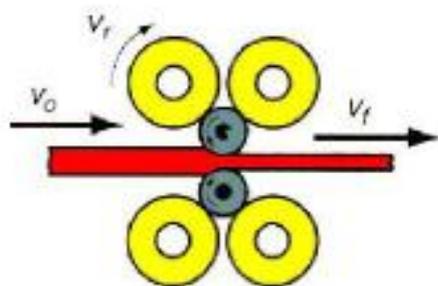
**DOS
RODILLOS**



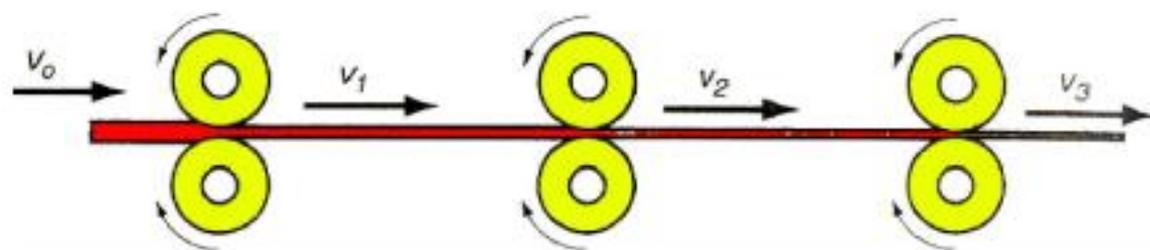
TRES RODILLOS



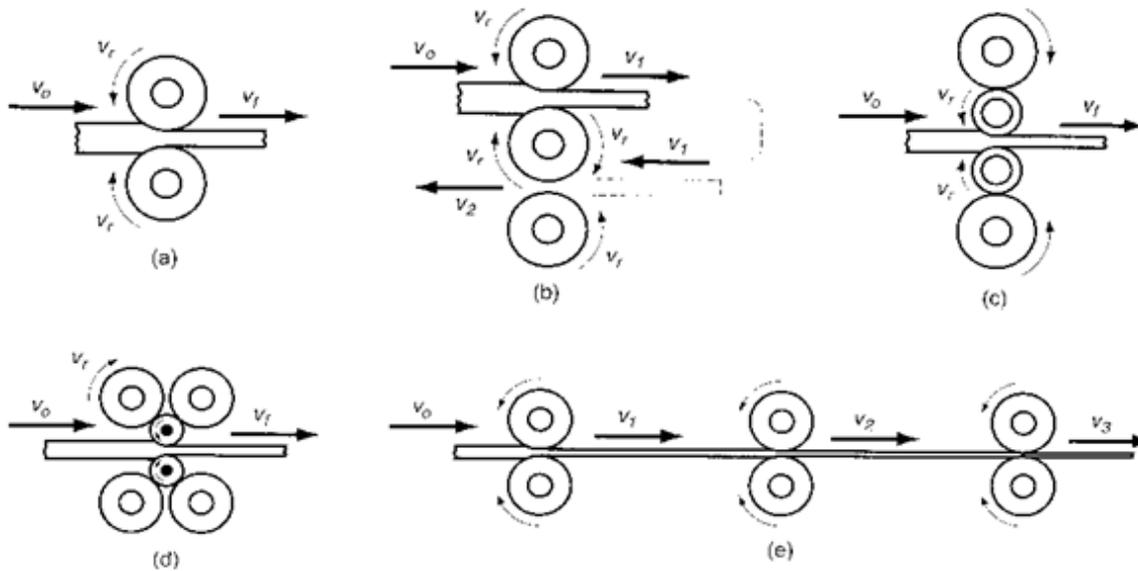
**CUATRO
RODILLOS**



**MOLINO EN
CONJUNTO**



**MOLINO DE RODILLOS
EN TANDEM**



EN LA FIGURA. Se observan varias configuraciones de rodillos de laminación:

- (a) dos rodillos,
- (b) tres rodillos,
- (c) cuatro rodillos,
- (d) rodillo en conjunto

y (e) rodillo de rodillos en tándem, o tren laminador.

Además de reducir el espesor, el laminado incrementa usualmente el ancho del material de trabajo. Esto se llama *esparcido (spreading)*, y tiende a ser más pronunciado con bajas relaciones entre ancho y espesor, así como con bajos coeficientes de fricción. Existe la conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen que entra:

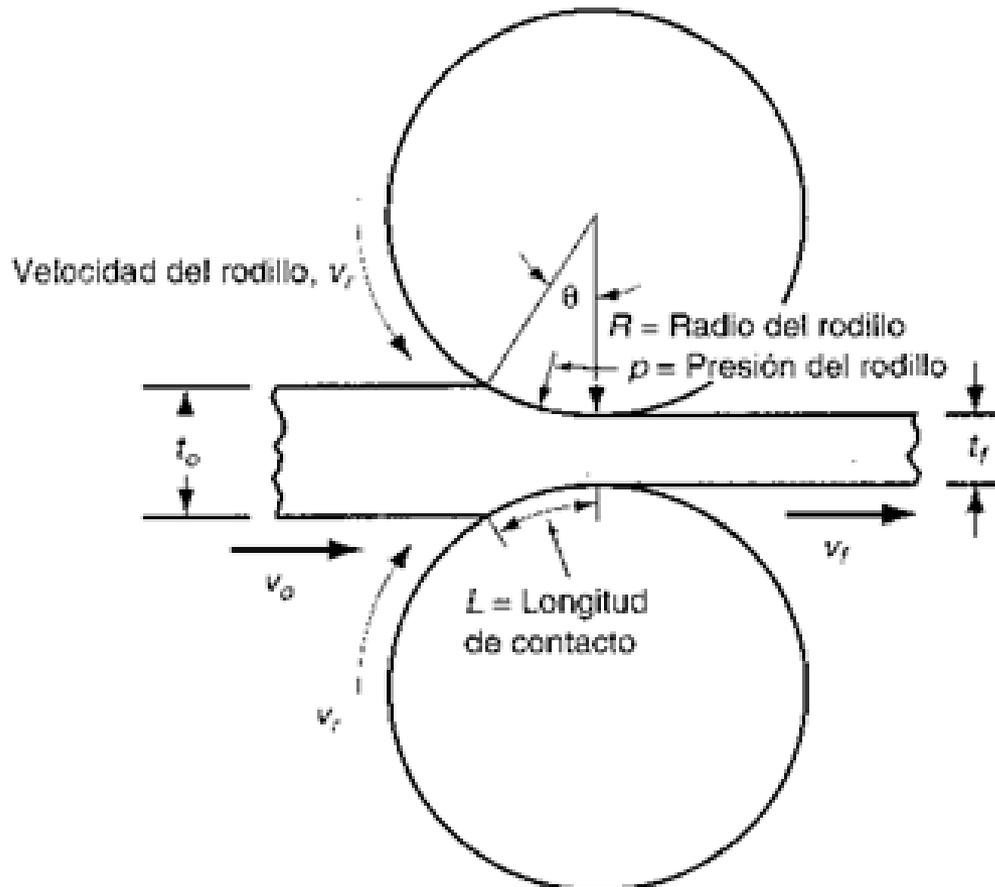
$$t_o \cdot w_o \cdot L_o = t_f \cdot w_f \cdot L_f$$

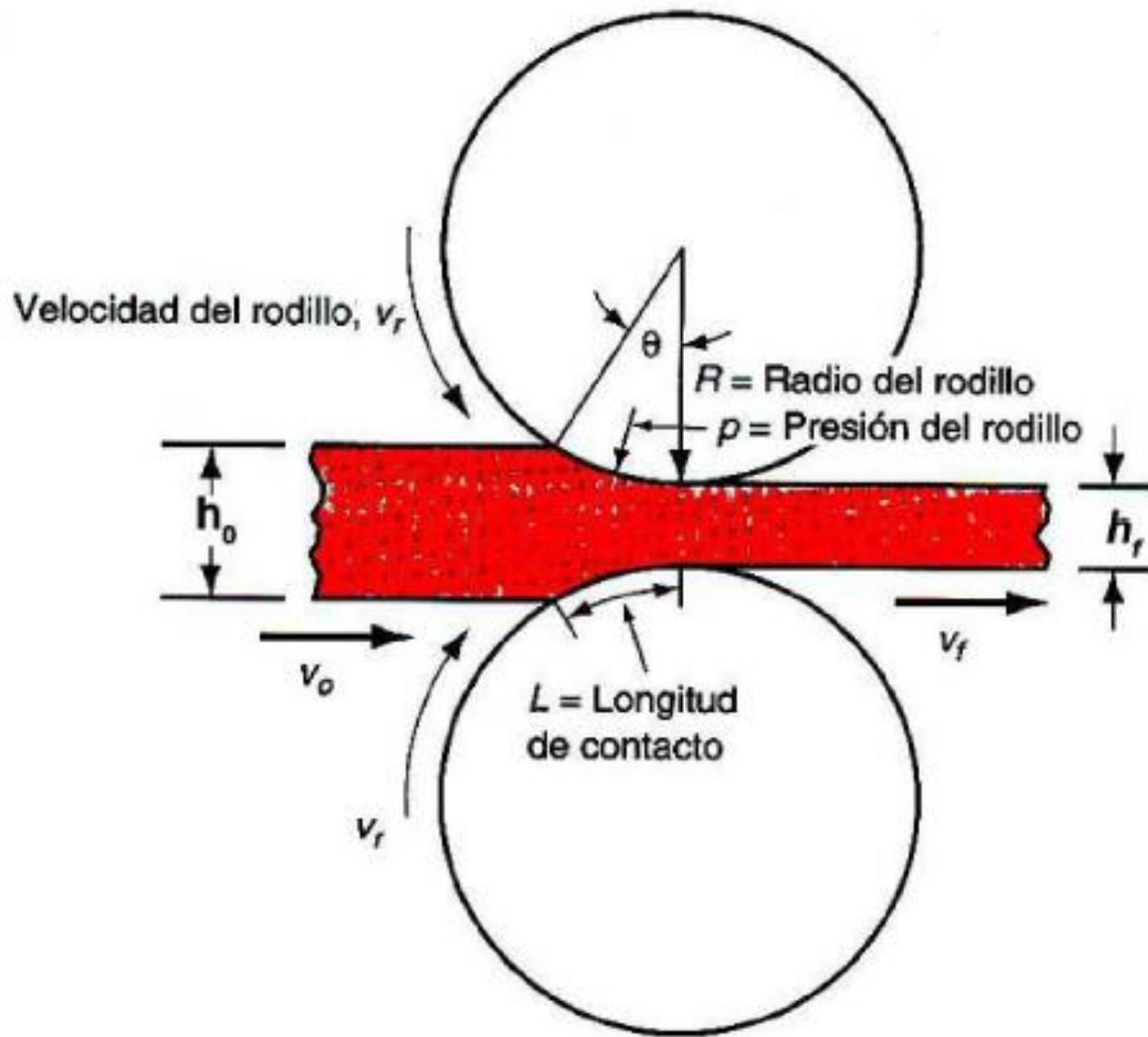
$$t_o \cdot w_o \cdot L_o = t_f \cdot w_f \cdot L_f$$

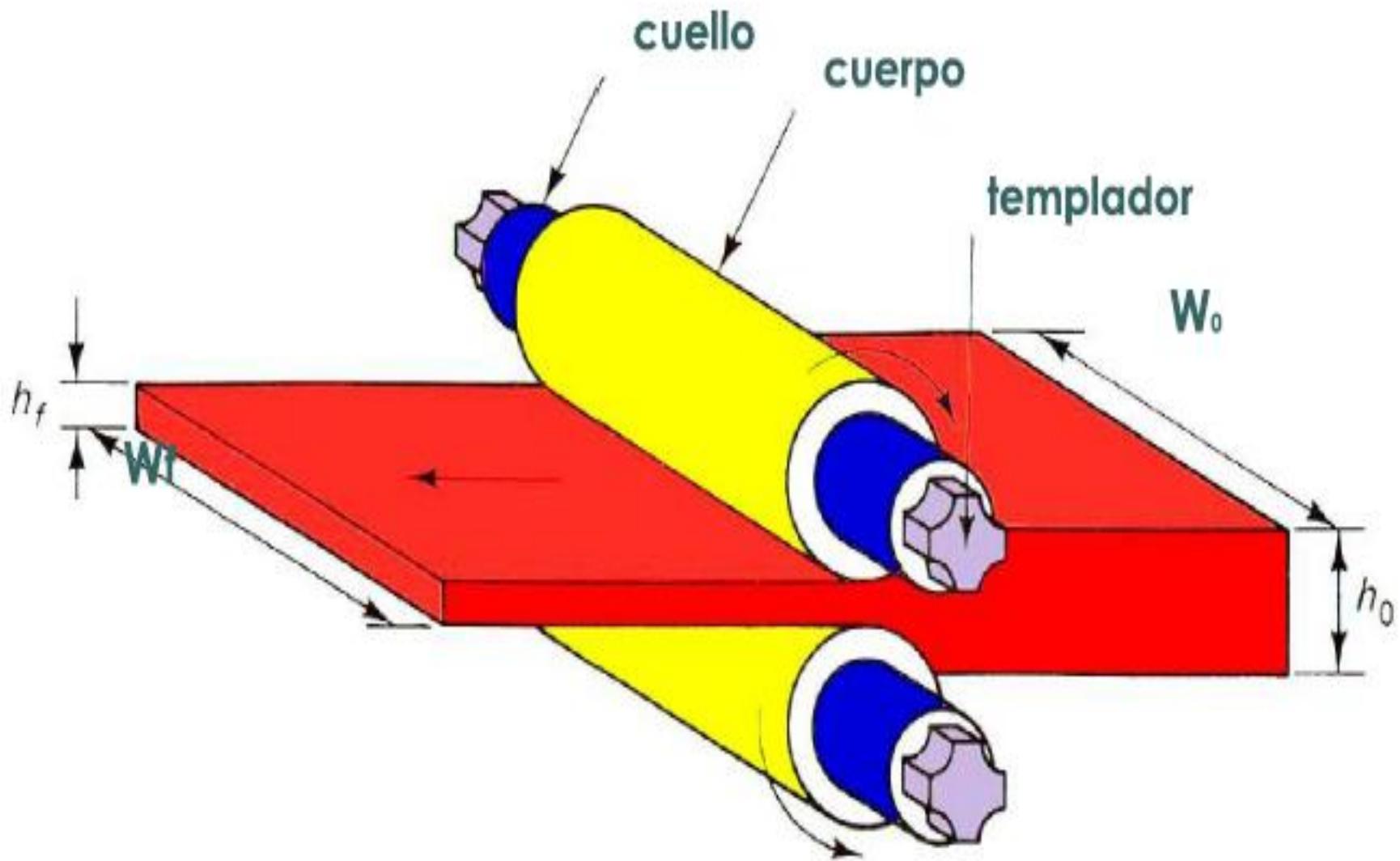
w_o y w_f son los anchos del trabajo antes y después (mm), mientras que L_o y L_f son las longitudes antes y después (mm).

De igual forma, la velocidad volumétrica del material antes y después debe ser la misma, así que las velocidades pueden relacionarse antes y después de la siguiente manera:

$t_o \cdot w_o \cdot v_o = t_f \cdot w_f \cdot v_f$ (donde v_o y v_f son las velocidades de entrada y salida).







Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo a lo largo de un arco de contacto definido por el ángulo ϕ . Cada rodillo tiene un radio R y su velocidad de rotación tiene una velocidad superficial v_r .

Esta velocidad es mayor que la velocidad de trabajo v_o y menor que la velocidad de salida v_f . Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos.

Sin embargo, existe un punto a lo largo del arco donde la velocidad del trabajo iguala la velocidad del rodillo.

Este punto se llama punto de no deslizamiento, también conocido como punto neutro.

A cualquier lado de este punto, ocurren deslizamientos y fricción entre el rodillo y el material de trabajo. La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo puede medirse por medio del deslizamiento hacia adelante (forward slip), este término se usa en laminado y se define como: $s = (v_f - v_r) / v_r$

Donde:

s = deslizamiento hacia adelante,

v_f = velocidad final del trabajo (salida) (m/seg);

v_r = velocidad del rodillo (m/seg).

El esfuerzo real experimentado por el trabajo laminado se basa en el espesor del material antes y después del laminado. En forma de ecuación, $\epsilon = \ln (t_o/t_f)$

Se puede calcular una aproximación el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el material de trabajo en la brecha entre los rodillos. Esto es, $F = Y_f \cdot wL$

donde Y_f = esfuerzo de fluencia promedio, en (MPa); el producto wL es el área de contacto rodillo-trabajo (mm^2).

La longitud de contacto se puede aproximar mediante: $L = R \cdot \phi$ (radianes)



La fricción se presenta en el laminado con un cierto coeficiente de fricción, la fuerza de compresión de los rodillos multiplicada por el coef. de fricción da por resultado una fuerza entre los rodillos y el material de trabajo.

En el lado de la entrada del punto neutro, la fuerza de fricción tiene una dirección; en el otro lado, tiene una dirección opuesta.

Sin embargo, las dos fuerzas no son iguales. La fuerza de fricción es mayor a la entrada, de manera que la fuerza neta jala al material a través de los rodillos.

Hay un límite para el máximo draft posible que puede alcanzar el laminado de productos planos con un coef. de fricción dado:

$$\text{draft}_{\max} = \mu^2 R$$

El coef. de fricción depende de varios factores, para nuestro caso se consideran los siguientes valores:

Laminado en frío = 0.1 a 0.2 Laminado en caliente = 0.4 a 0.7

El momento de torsión en laminado se puede estimar suponiendo que la fuerza ejercida por los rodillos se centra en el trabajo, conforme pasa entre ellos y actúa con un brazo de palanca de la mitad de la longitud de contacto L.

Entonces, el momento de torsión para cada rodillo es: $T = F \cdot L / 2$

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del momento de torsión y la velocidad angular. La velocidad angular es $2\pi N$, donde N = velocidad de rotación del rodillo.

Así, la potencia para cada rodillo es $2\pi NT$. Al sustituir en la ecuación anterior por el momento de torsión en esta expresión para la potencia, y al duplicar el valor, dado que un dúo de laminado posee dos rodillos, obtenemos la siguiente expresión. $P = 2 \pi N \cdot F \cdot L$

donde P = potencia (J/s); N = velocidad de rotación (1/seg.); F = fuerza de laminado, (N); L = longitud de contacto, (m).

OTRAS OPERACIONES DE LAMINADO

Algunos otros procesos de deformación volumétrica usan rodillos para formar las partes de trabajo, estas operaciones incluyen:

laminado de anillos, laminado de roscas, laminado de engranajes y perforado de rodillos.

La fuerza requerida para la deformación por laminación, se aproxima mediante :

$$F = \tilde{\sigma}_c W L$$

WL = área de contacto material - rodillo

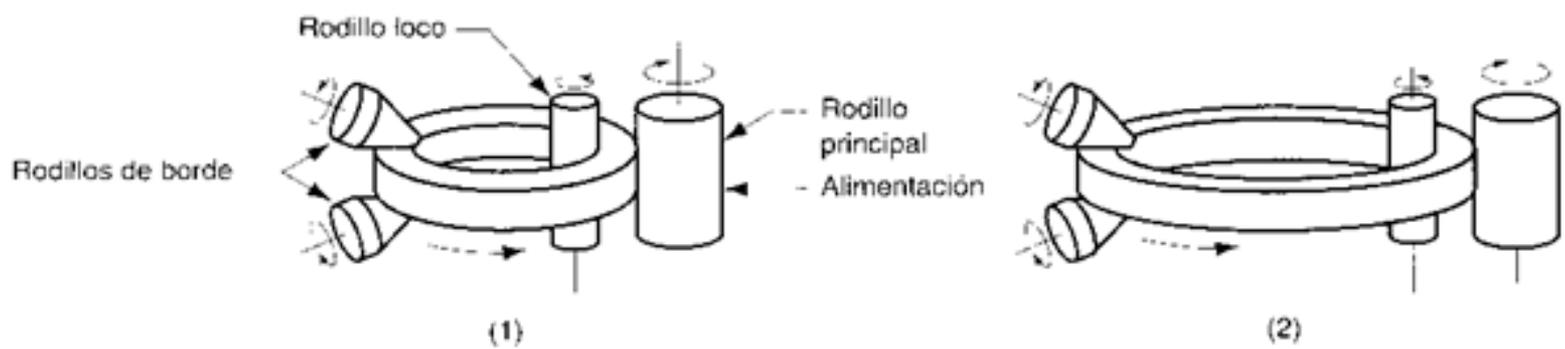
Donde :
$$\tilde{\sigma}_c = \frac{K \epsilon^n}{1 + \eta}$$

W = Ancho de la placa

L = longitud de contacto rodillo y material

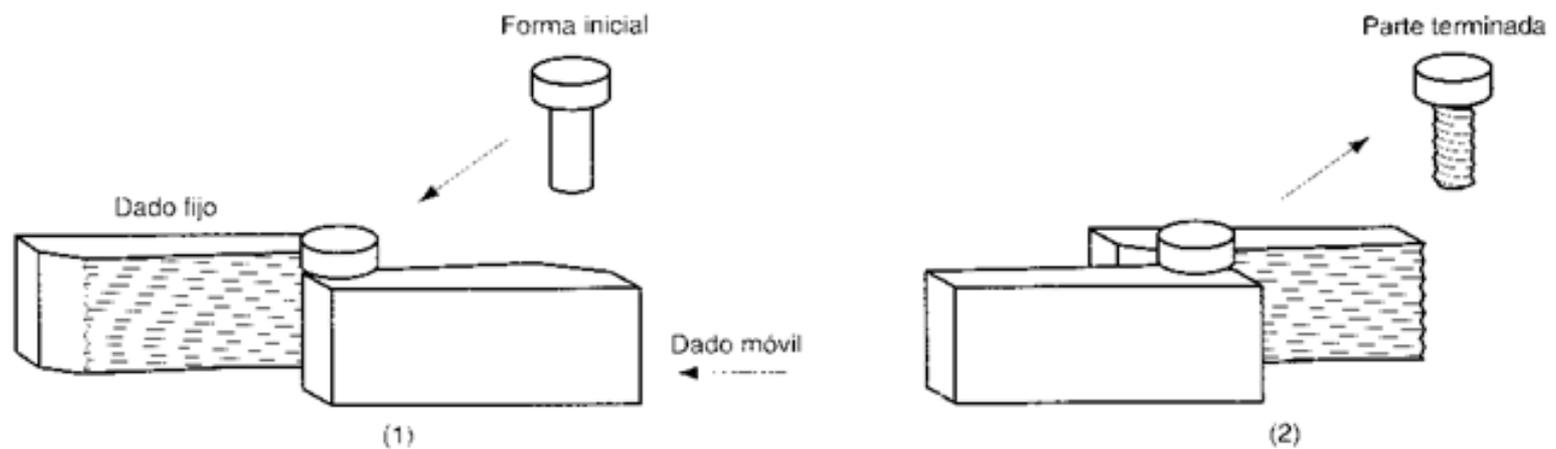
La longitud de contacto se puede deducir por trigonometría y aproximar a :

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



EL LAMINADO DE ANILLOS es un proceso de deformación que lamina las paredes gruesas de un anillo para obtener anillos de paredes más delgadas, pero de un diámetro mayor. Se aplica usualmente en procesos de trabajo en caliente para anillos grandes y en procesos de trabajo en frío para anillos pequeños. Las ventajas del laminado de anillos sobre otros métodos para fabricar las mismas partes son: el ahorro de materias primas, la orientación ideal de los granos para la aplicación y el endurecimiento a través del trabajo en frío.

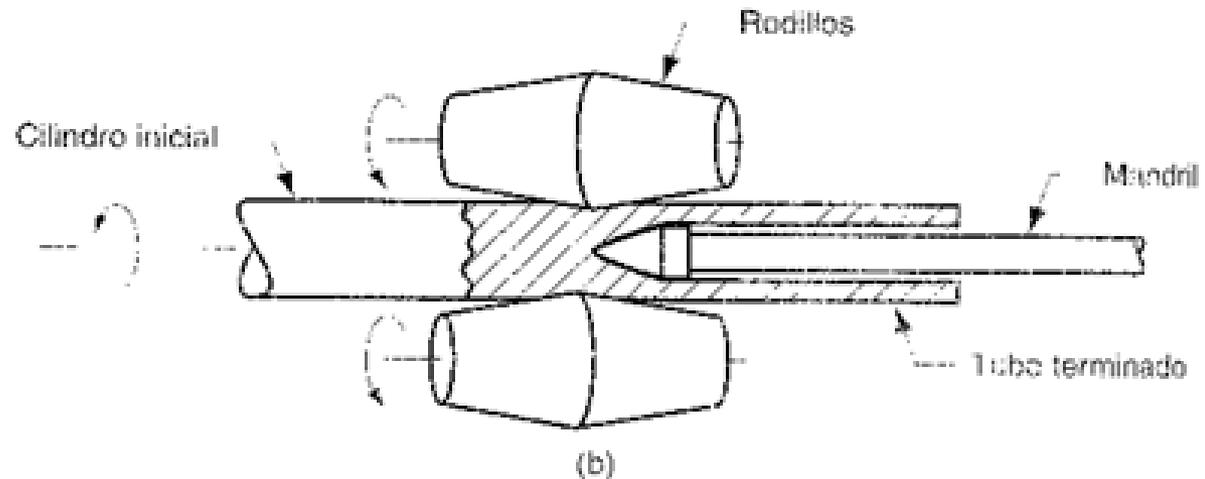
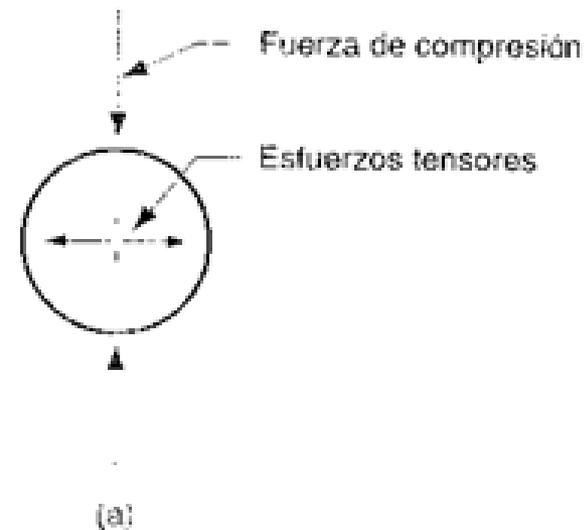
EL LAMINADO DE ROSCAS se usa para formar roscas en partes cilíndricas mediante su laminación entre dos dados. Es el proceso comercial más importante para producción masiva de componentes con roscas externas (pernos y tornillos). La mayoría de las operaciones de laminado de roscas se realizan por trabajo en frío utilizando máquinas laminadoras de roscas.



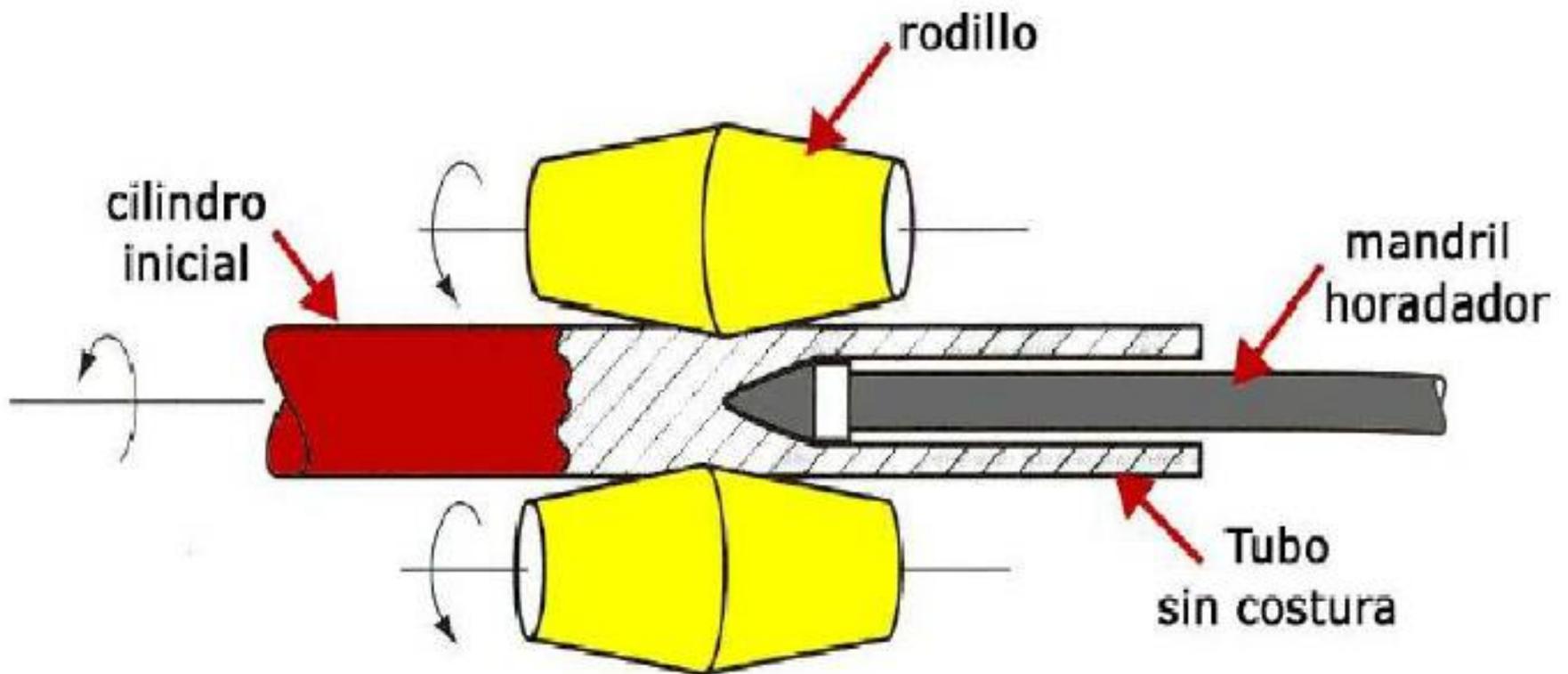
PERFORADO DE RODILLOS:

Es un proceso especializado de trabajo en caliente para hacer tubos sin costura de paredes gruesas. Utiliza dos rodillos opuestos y por lo tanto se agrupa entre los procesos de laminado. El proceso se basa en el principio que al comprimir un sólido cilíndrico sobre su circunferencia, como en la fig. (a), se desarrollan altos esfuerzos de tensión en su centro.

Si la compresión es lo suficientemente alta se forma una grieta interna. Este principio se aprovecha en el perforado de rodillos mediante la disposición que se muestra en la fig. (b). Los esfuerzos de compresión se aplican sobre el tocho cilíndrico por dos rodillos, cuyos ejes se orientan en pequeños ángulos (alrededor de 6°) con respecto al eje del tocho, de esta manera la rotación tiende a tirar el tocho a través de los rodillos. Un mandril se encarga de controlar el tamaño y acabado de la perforación creada por la acción. Se usan los términos perforado rotatorio de tubos y proceso Mannesmann para esta operación en la fabricación de tubos.



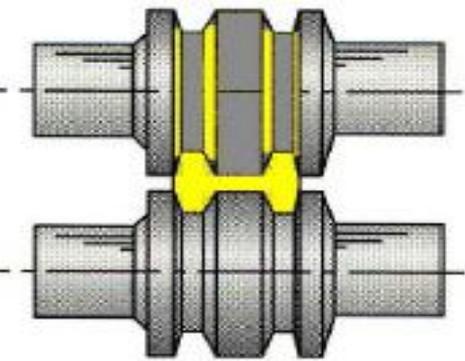
LAMINACIÓN DE TUBOS SIN COSTURA (PROCESO MANNESMANN)



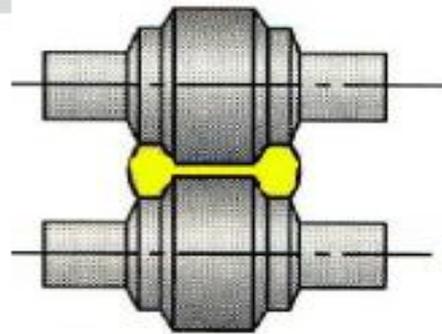




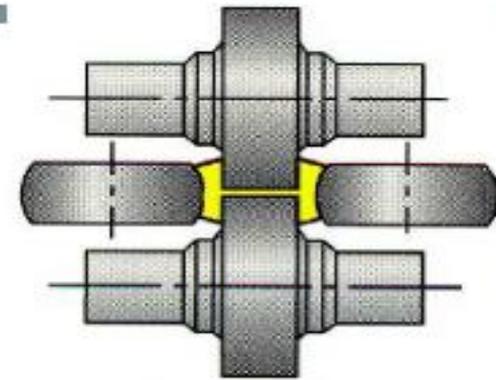
SECUENCIA DE ROLADO PARA LA OBTENCIÓN DE UN PERFIL ESTRUCTURAL "H"



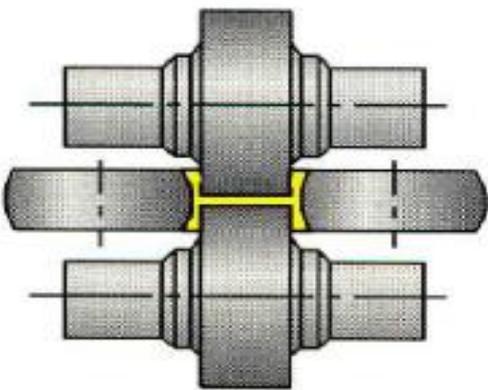
Desbastadores



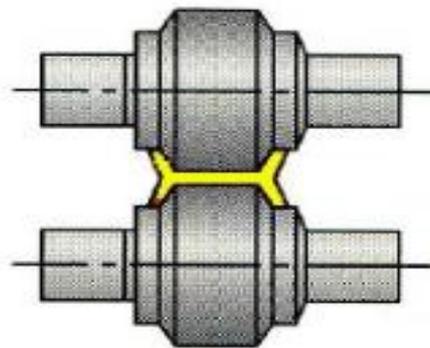
Canteadores



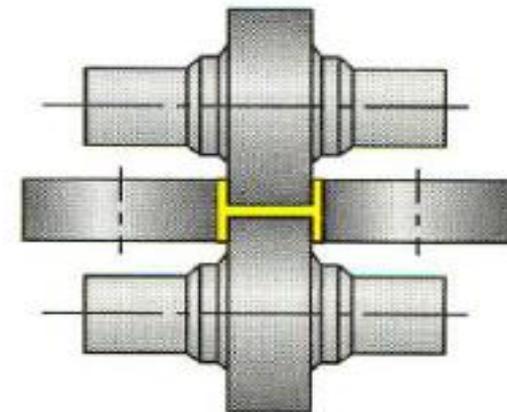
Desbastadores finos
(horizontal y vertical)



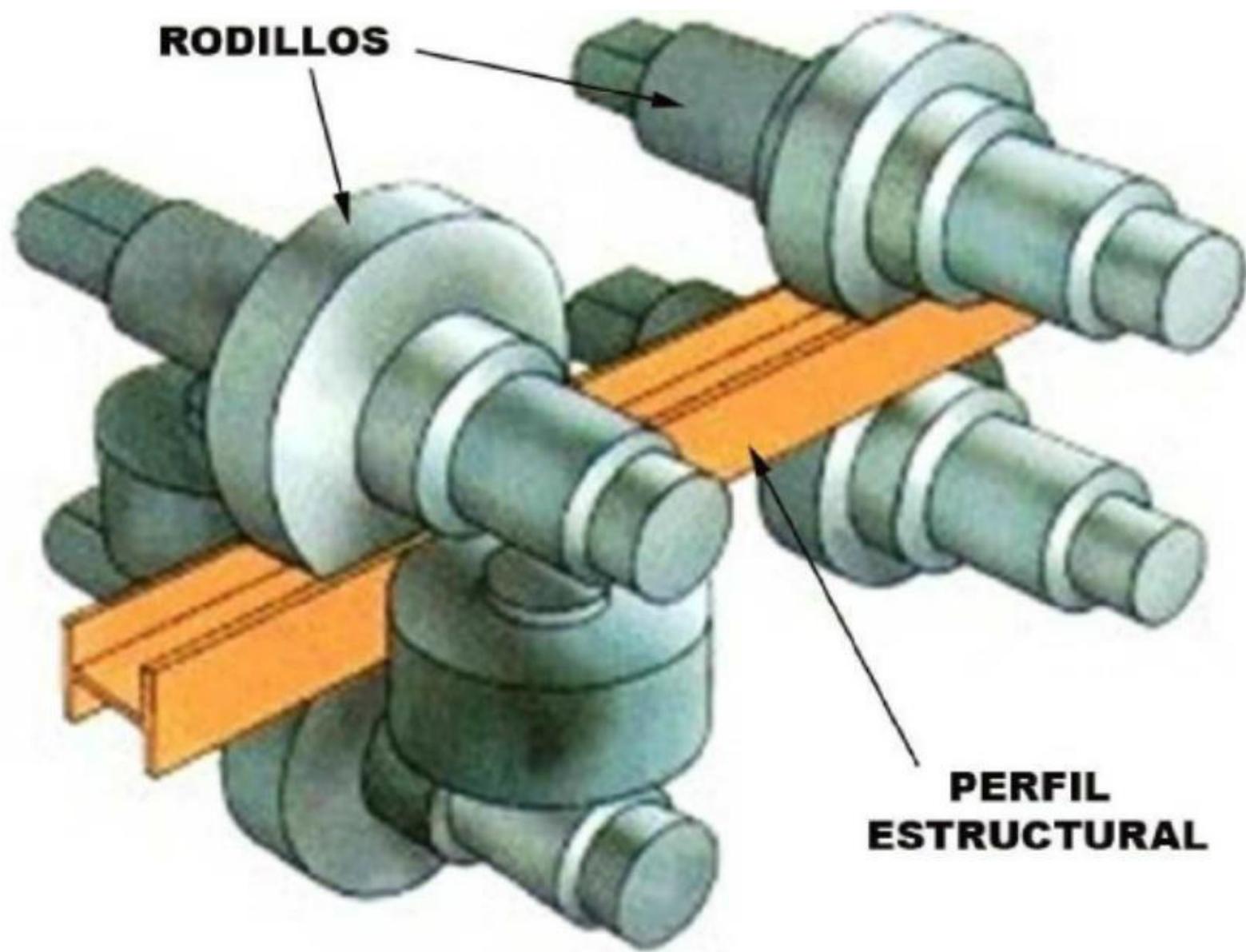
Rodillos intermedios
(horizontal y vertical)



Canteadores



Rodillos terminadores
(horizontal y vertical)



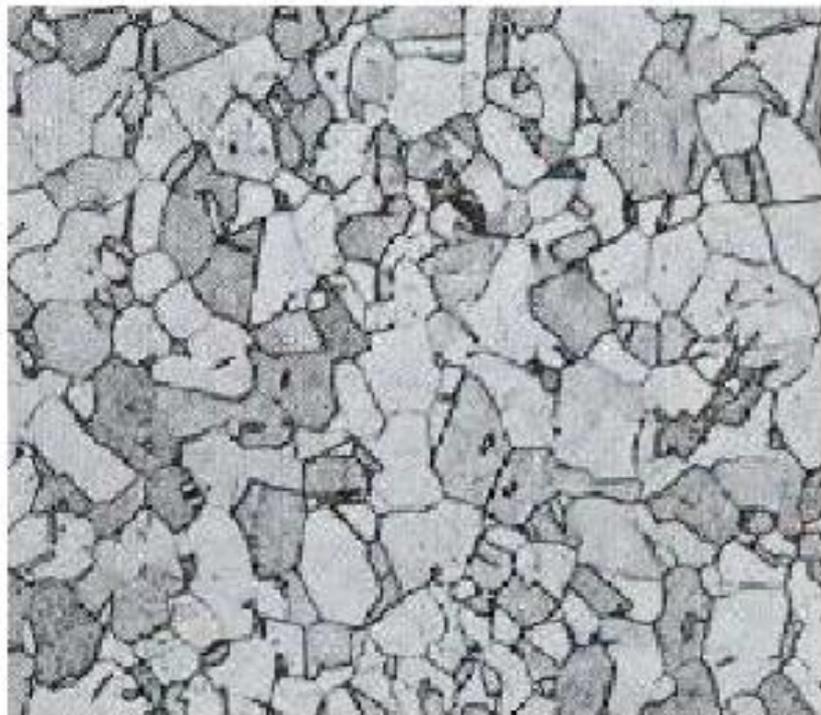


LAMINACIÓN EN FRÍO

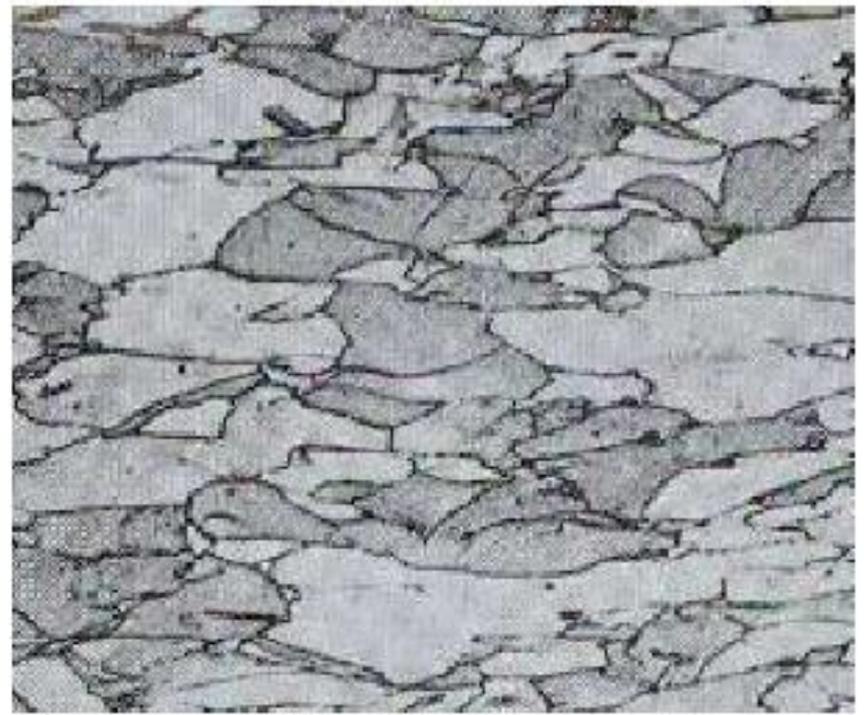


ALTERACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA POR LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN FRÍO

Antes de la deformación

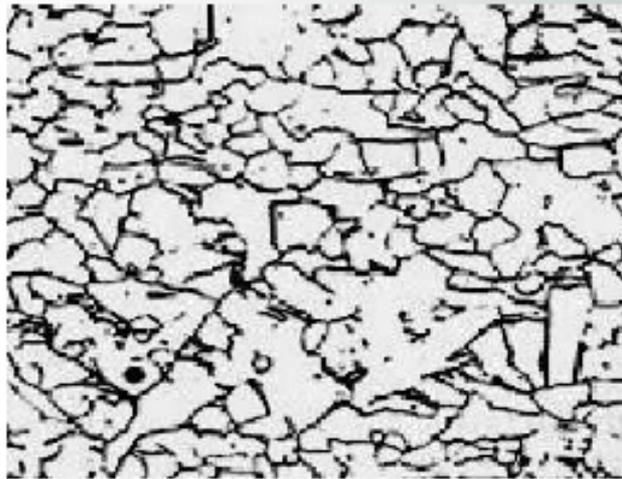


Después de la deformación



VARIACIÓN DE LA MICROESTRUCTURA vs % DE DEFORMACIÓN

ACERO BAJO EN CARBONO



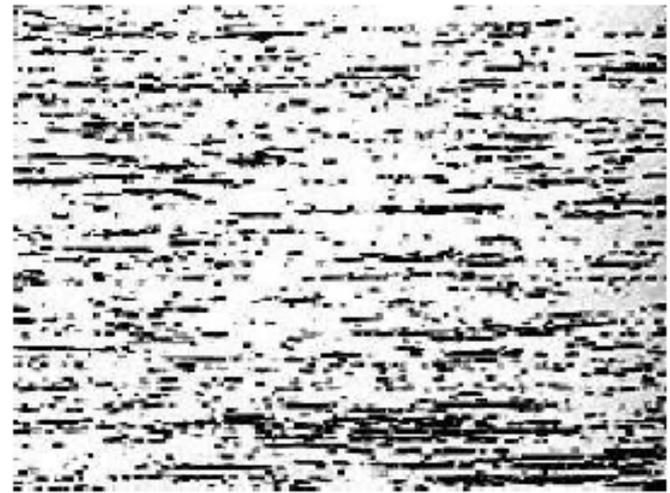
10% deformación



30% deformación

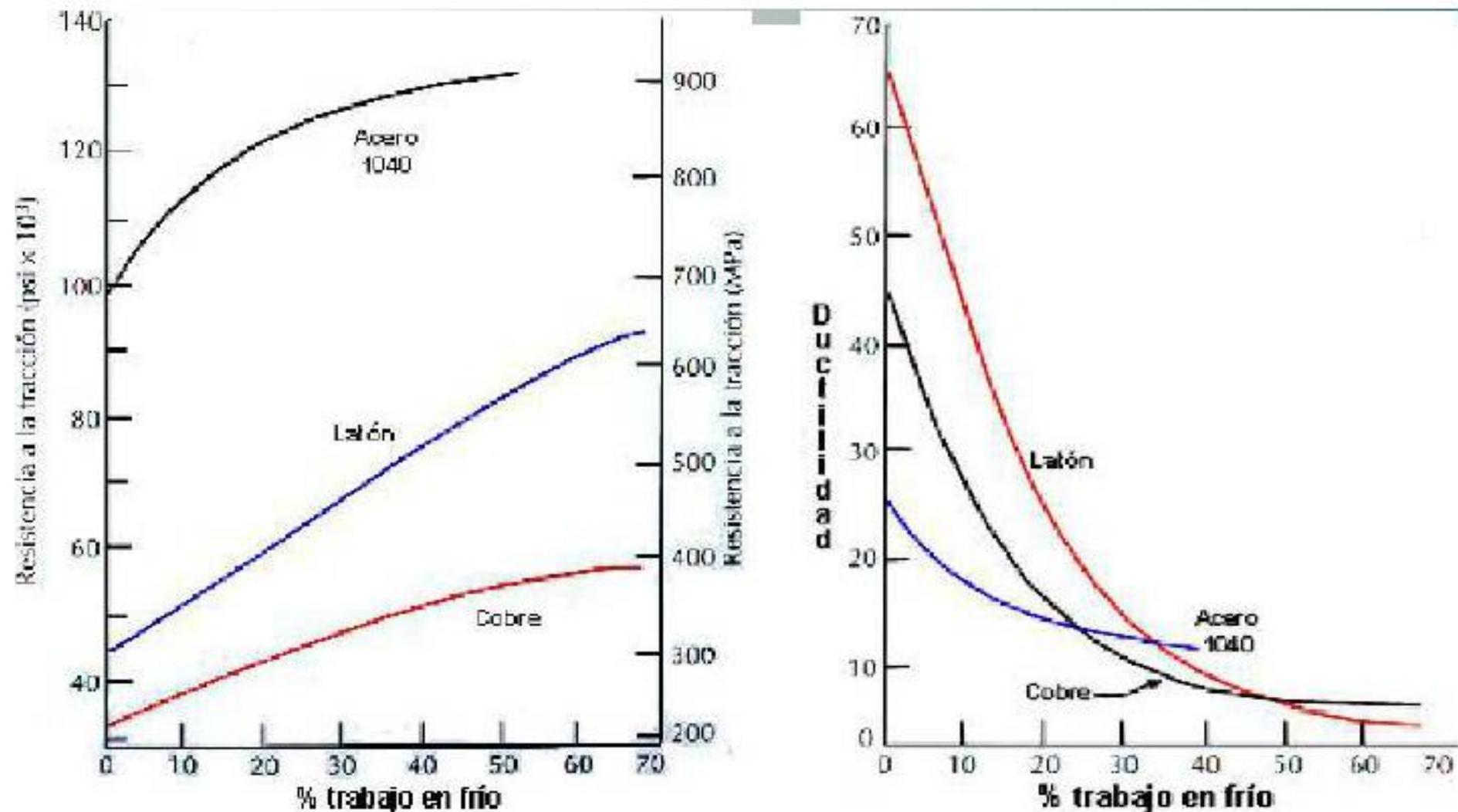


60% deformación



90% deformación

PROPIEDADES MECÁNICAS vs. % TRABAJO EN FRÍO



FORJADO

El forjado es un proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos dados, usando impacto o presión gradual para formar la parte.

EXTRUSIÓN

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

TREFILADO

En el contexto de los procesos de deformación volumétrica, el estirado es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce al tirar del material a través de la abertura de un dado. Las características generales del proceso son similar a la extrusión, la diferencia es que en el estirado el material de trabajo se tira a través del dado, mientras que en la extrusión se empuja a través del dado.