

MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO

DEFORMACIÓN PLÁSTICA:

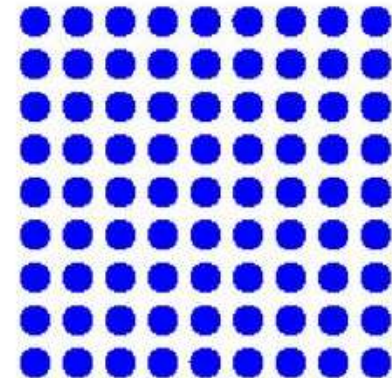
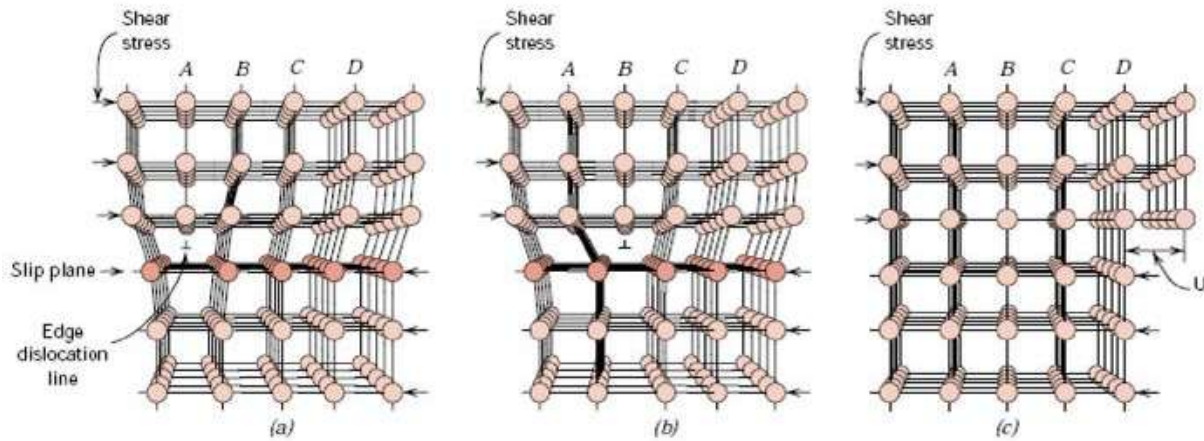
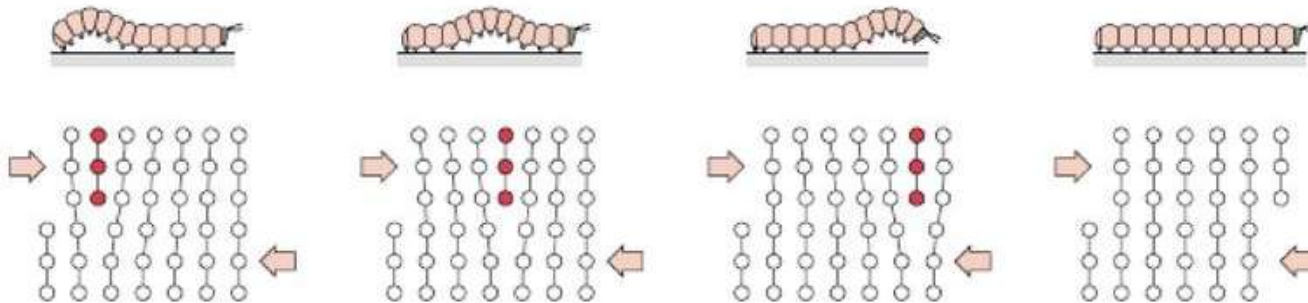
La deformación plástica se ve favorecida por la presencia de dislocaciones

- Dos tipos de dislocaciones:

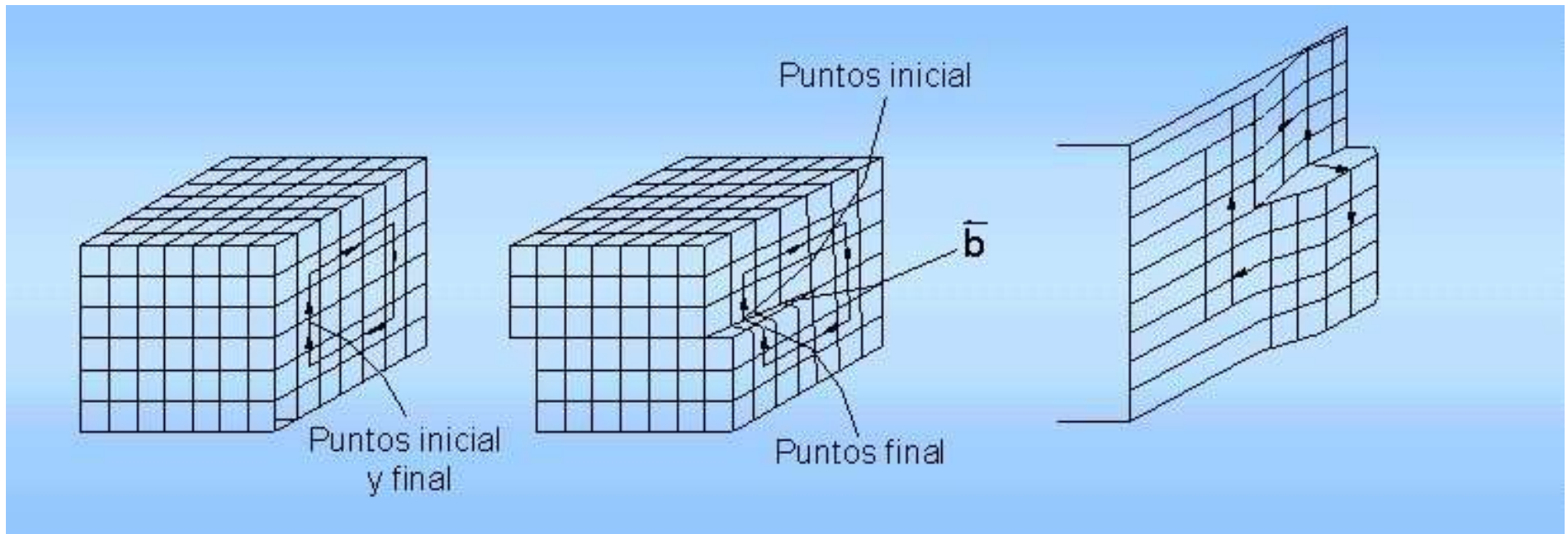
De borde o de cuña

Helicoidales

Dislocación de borde o de cuña



Dislocación helicoidal





INGENIERÍA DE MATERIALES

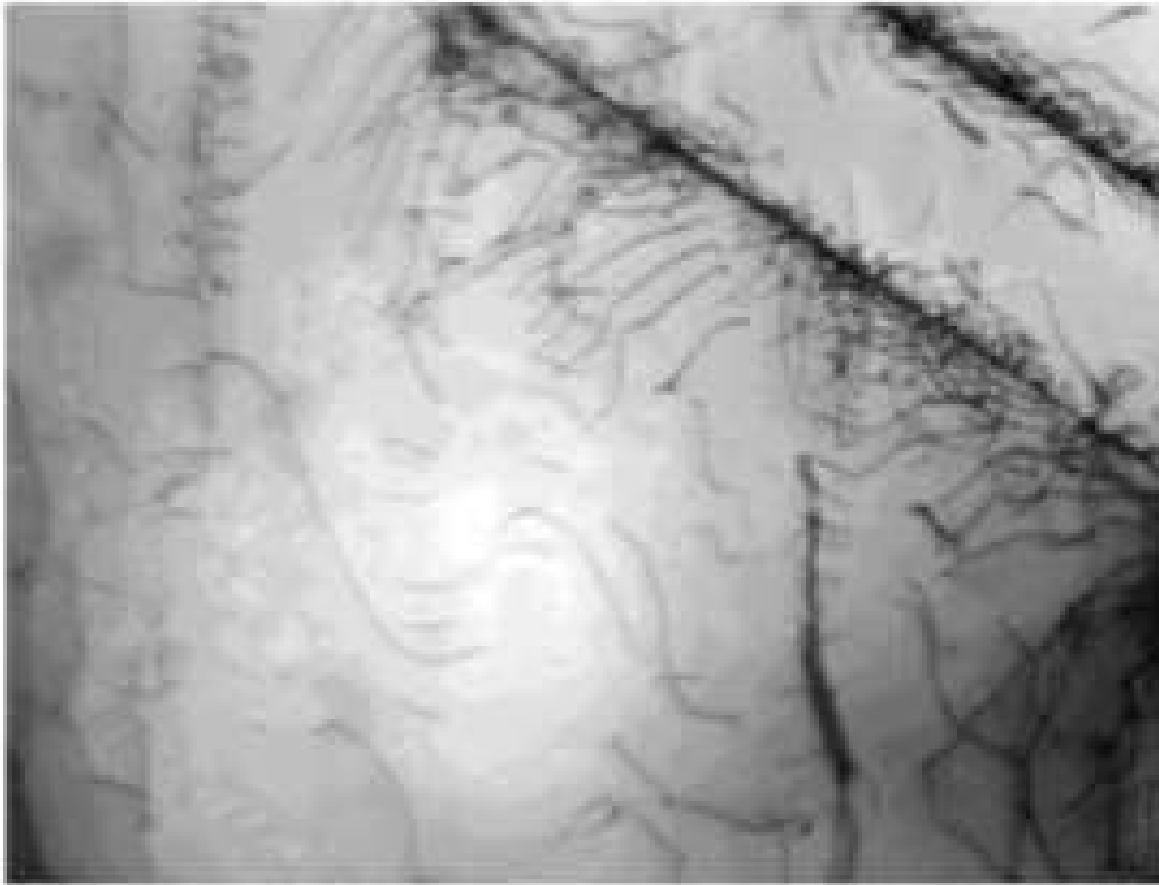
IMPERFECCIONES CRISTALINAS

DEFECTOS LINEALES

DISLOCACIONES

PROF. DR. JUAN CARLOS GARCÍA GONZÁLEZ

Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad de la Pacifico, Valparaíso, Chile



Por qué endurecer un metal?

- Disminuye la **cantidad de material** a utilizar y por lo tanto el costo total.
- Disminuye las **secciones resistentes**, de la pieza lo que conduce a componentes compactos que son convenientes en aplicaciones en estructuras en general.
- Permite obtener **piezas livianas**. Si bien esto depende en rigor de la relación resistencia/densidad del material (llamada **resistencia específica** de material), para un tipo de aleaciones dado (por ejemplo las aleaciones base Al) es muy poco lo que se puede hacer para variar la densidad mientras que la resistencia puede incrementarse sensiblemente. La reducción del peso es imprescindible en el caso de **estructuras móviles** (grúas, automóviles, maquinaria de transporte terrestre, aviones, etc.)
- Para obtener las propiedades requeridas para el uso, como resistencia, dureza, resistencia al desgaste o límite elástico.

Aclaración

El endurecimiento no es siempre beneficioso en todos los aspectos. Generalmente, al aumentar la resistencia mediante estos mecanismos, puede disminuir la ductilidad y tenacidad, dependiendo del mecanismo, pueden modificarse otras propiedades.

Endurecer un material no significa simplemente “hacerlo mejor”, sino modificar sus propiedades para obtener la combinación adecuada para una determinada aplicación

1) Endurecimiento por deformación en frío

El metal debe tener aptitud para la deformación

Se crean nuevas dislocaciones a medida que el material va siendo deformados

La densidad de dislocaciones aumenta, dificultando su movimiento

Endurecimiento por deformación en frío

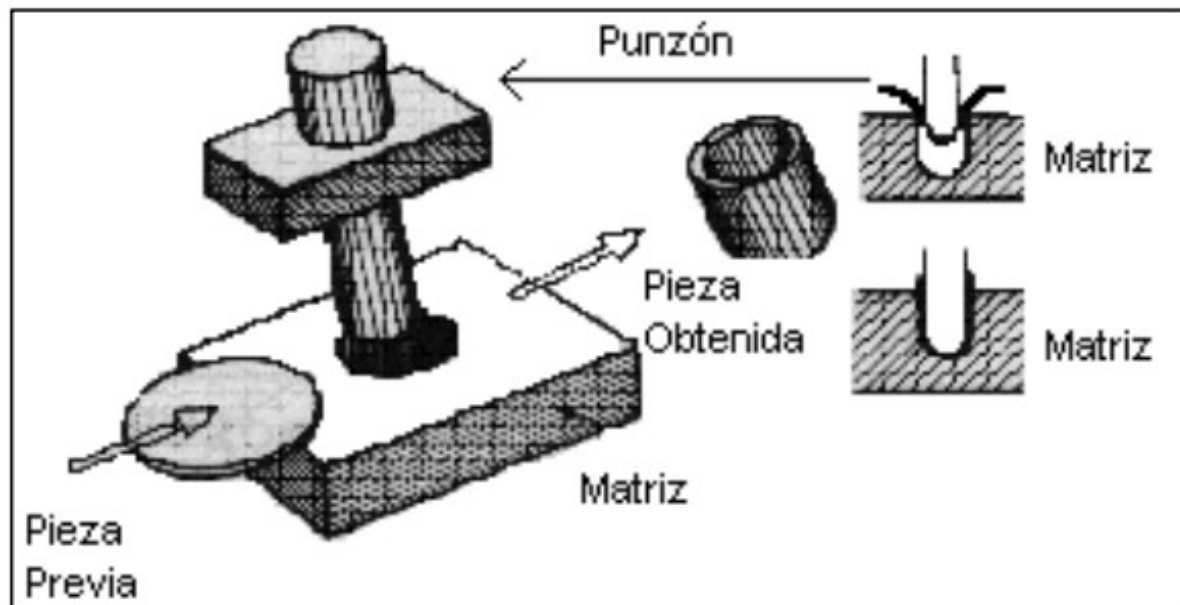
$$\sigma_f = \sigma_0 + k\sqrt{\rho}$$

σ_f : Tensión de fluencia

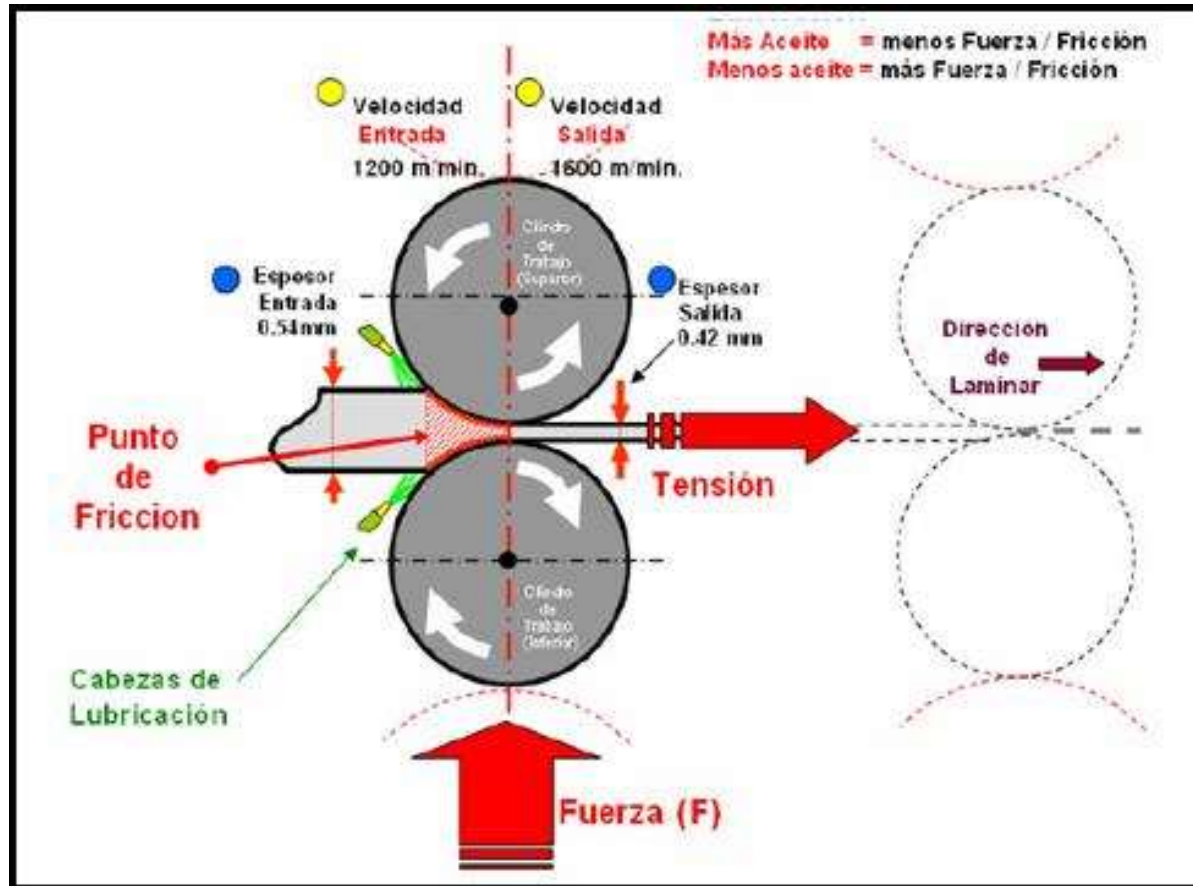
ρ : Densidad de dislocaciones (defectos 2D)

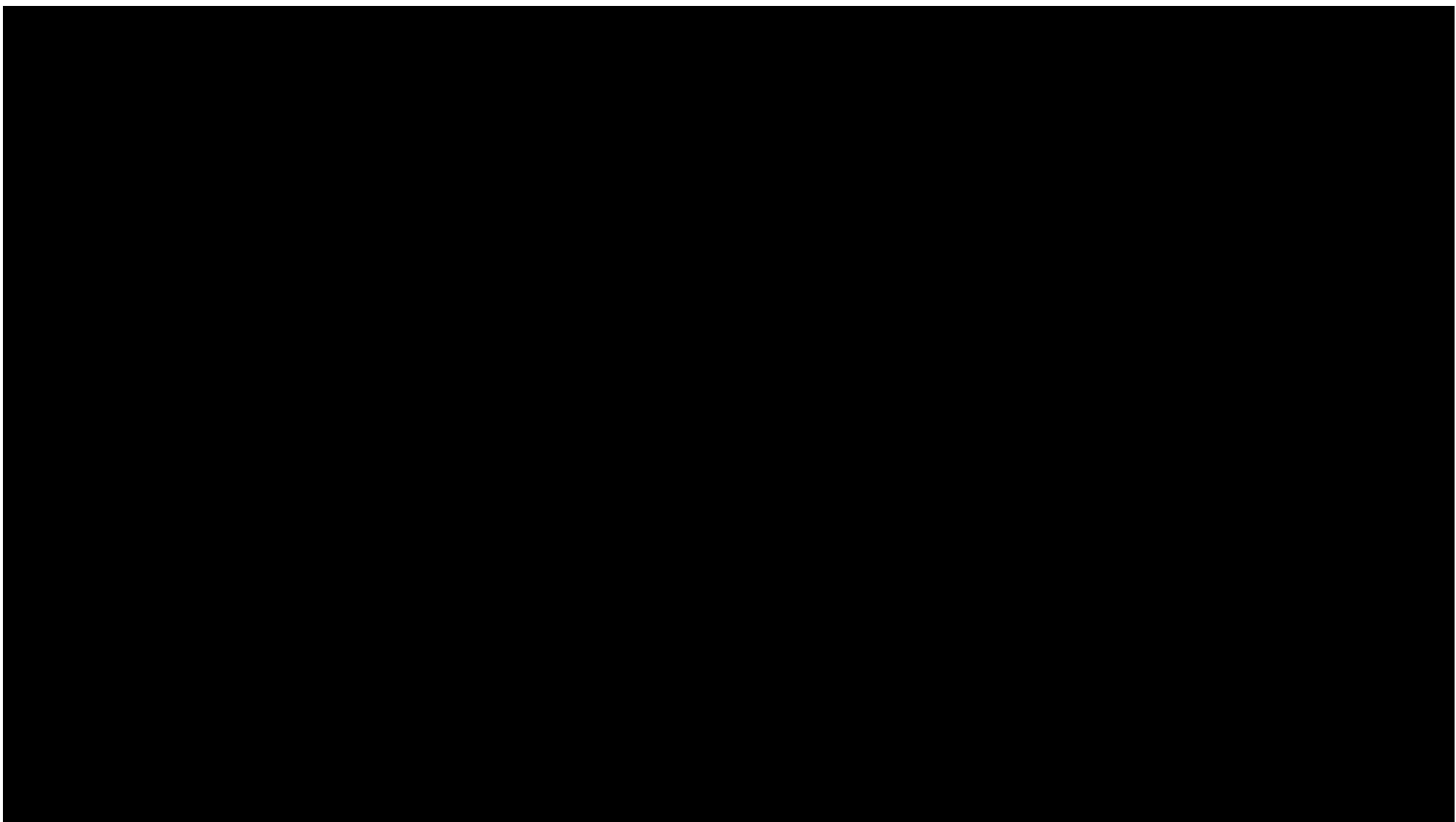
k : Constante que depende del módulo de corte.

Embutido

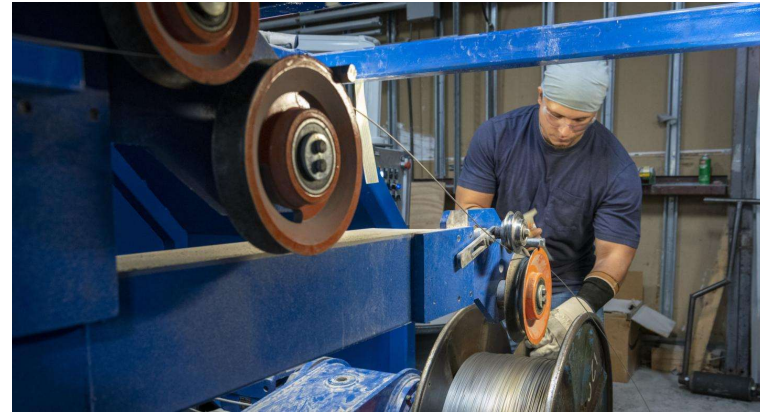
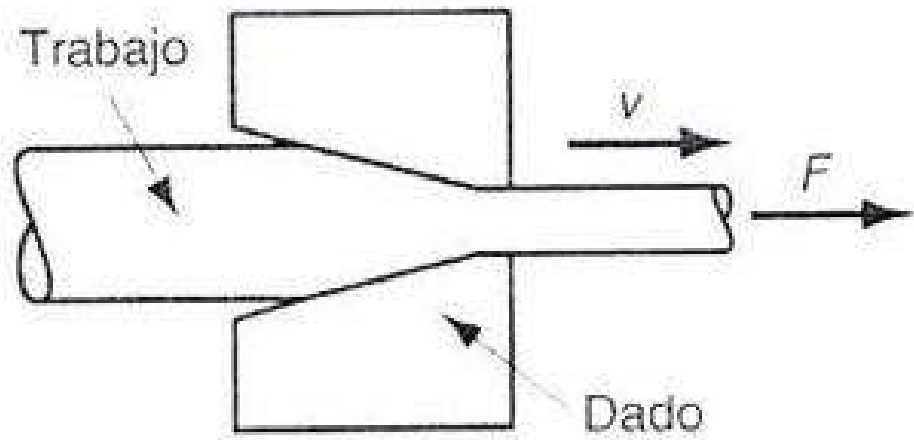


Laminado

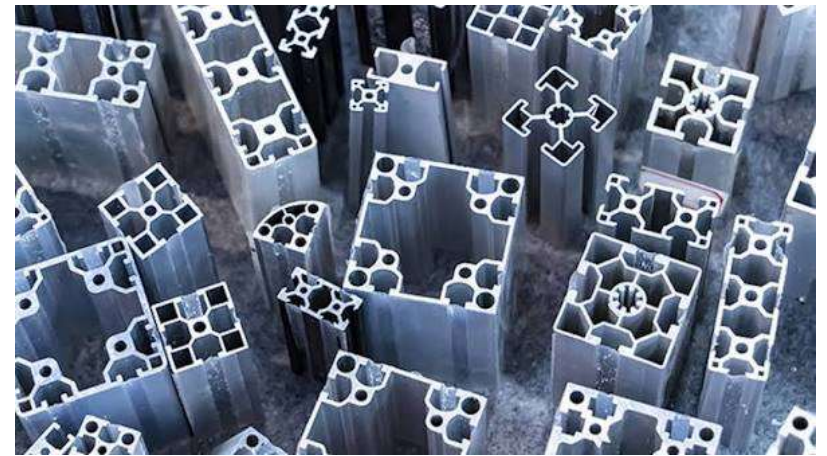
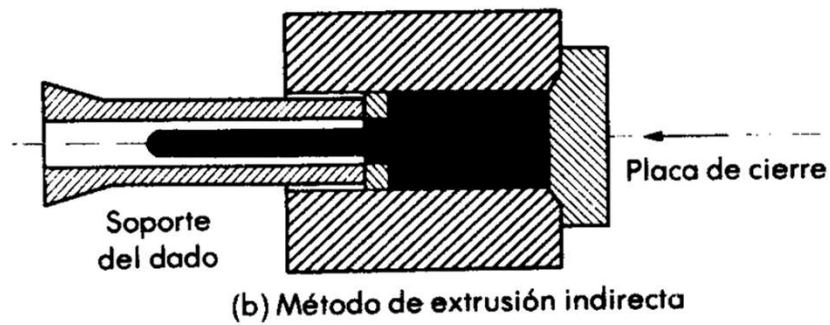
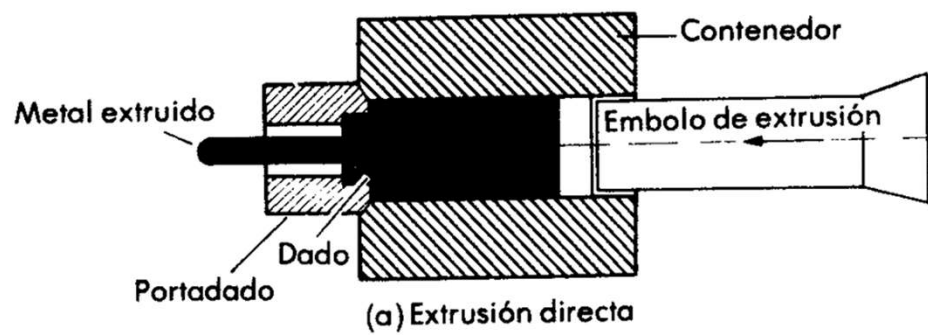


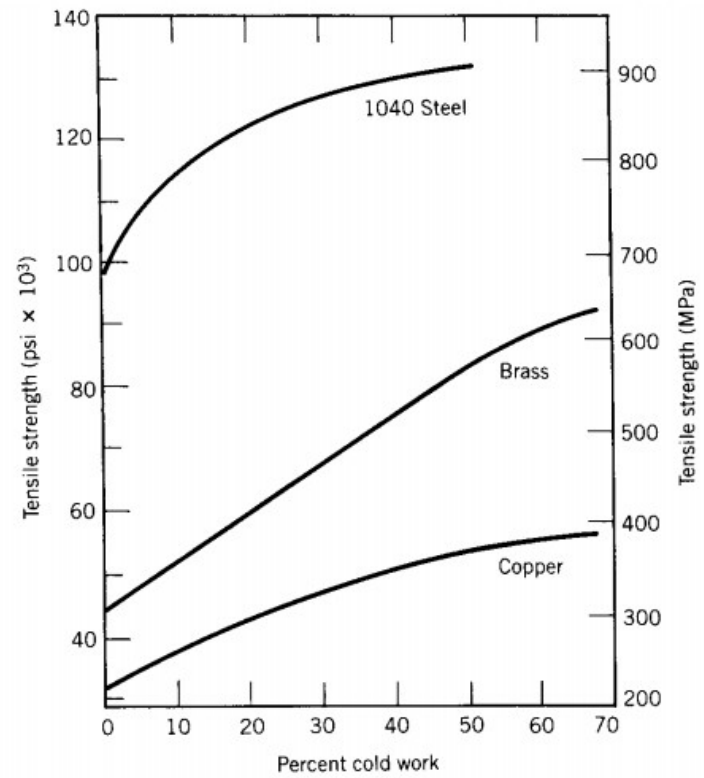
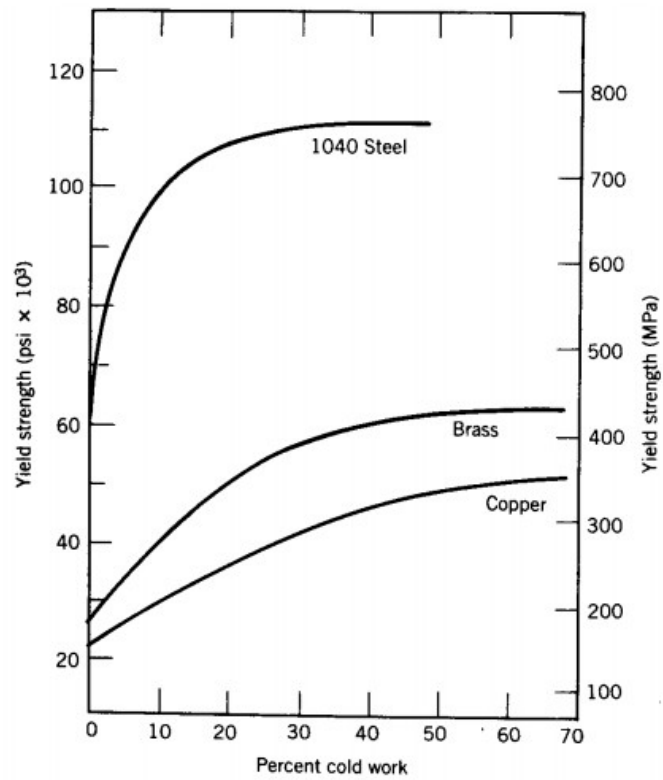


Trefilado

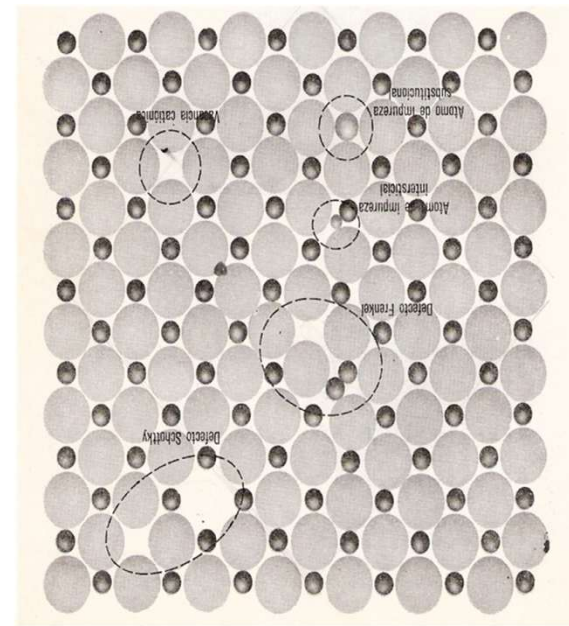
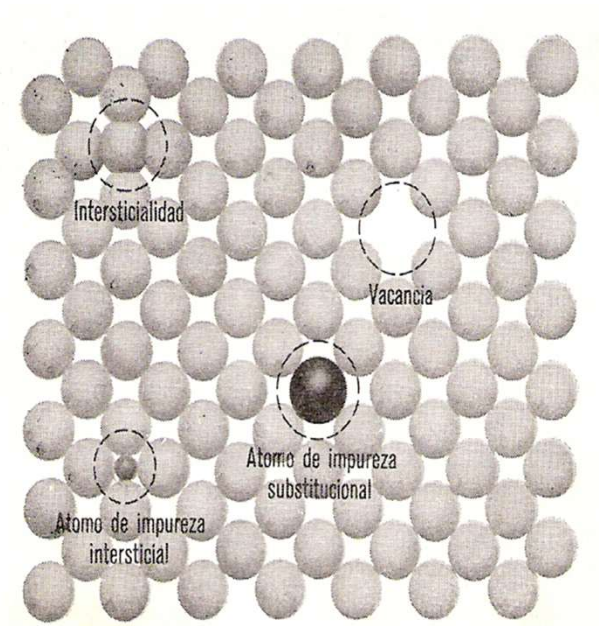


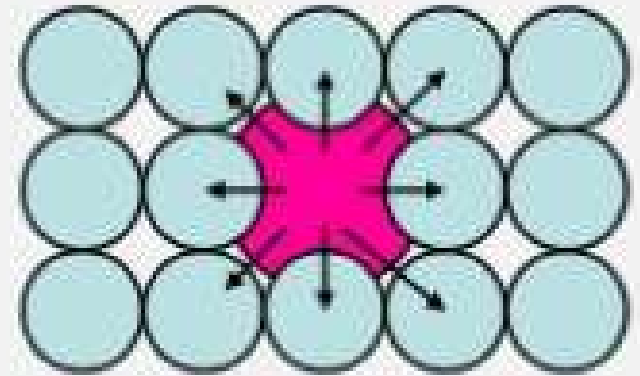
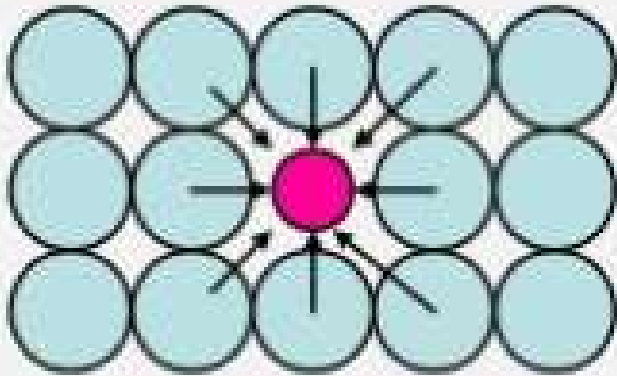
Extrusión





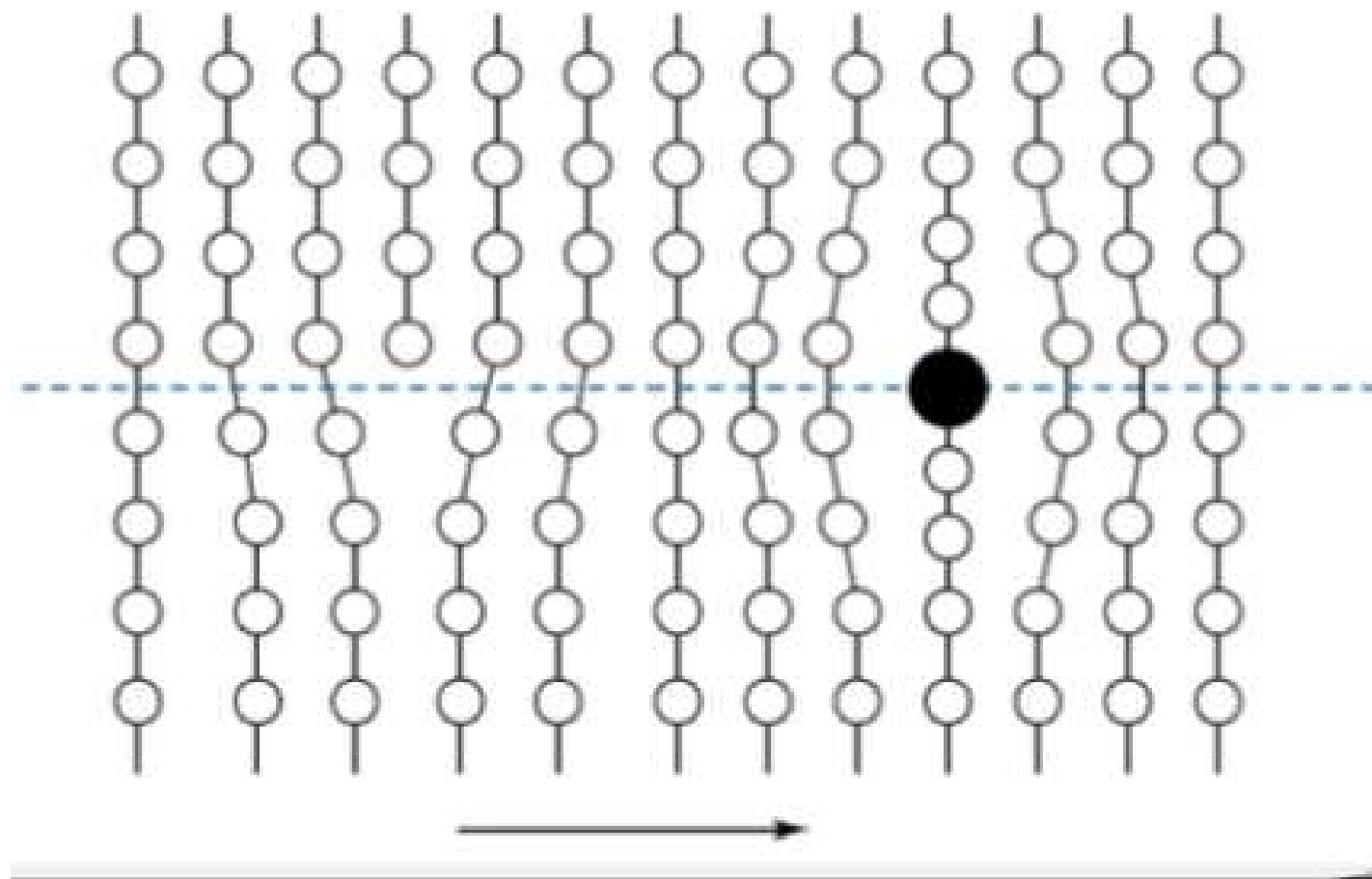
2) Endurecimiento por Solución Sólida



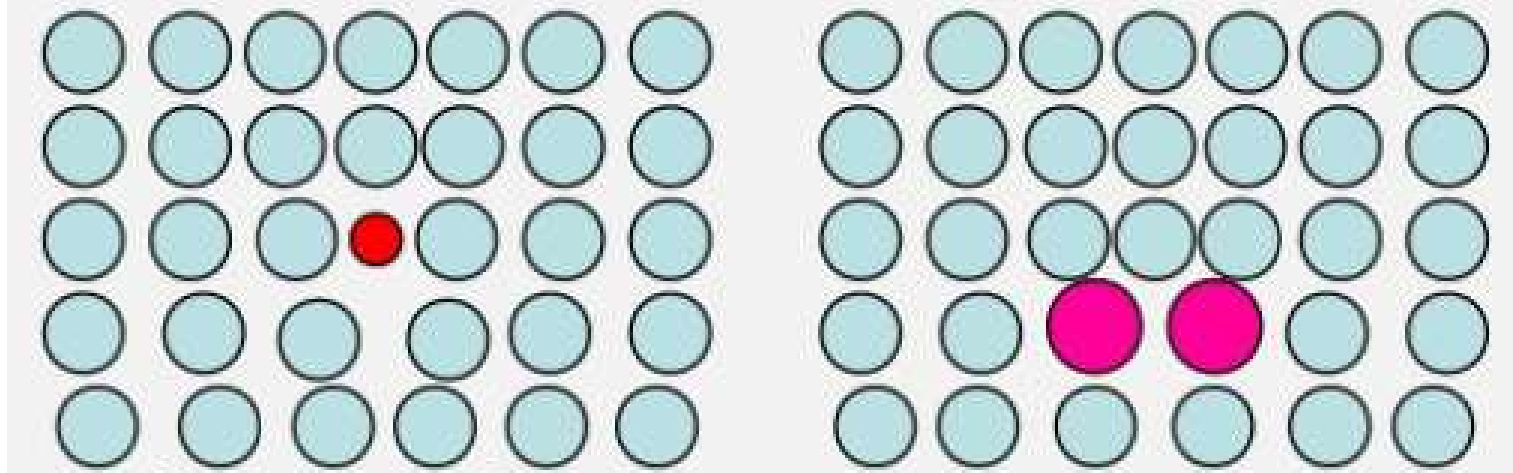


La adición de átomos distintos distorsiona la red.

Hacen más difícil el movimiento de las dislocaciones



Anclado de dislocaciones

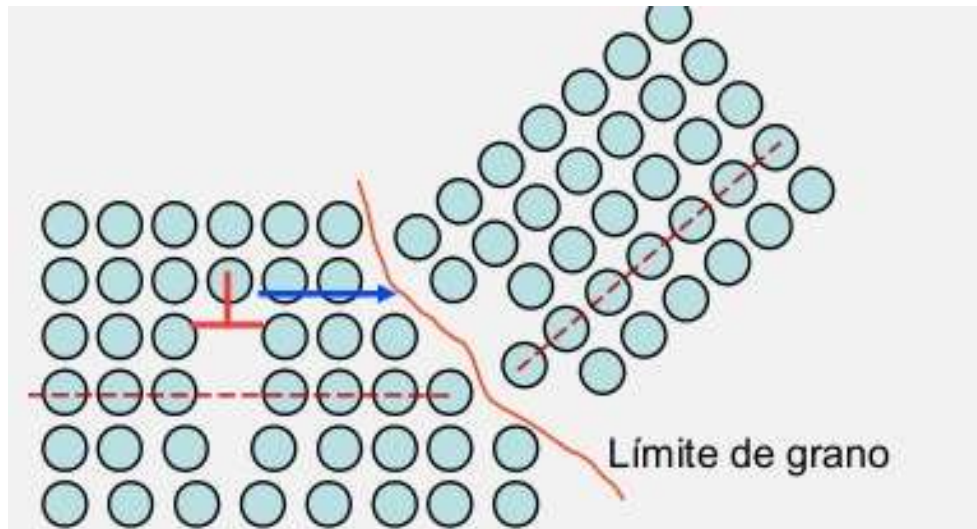


Ejemplos

Aleación	Elemento de soluto	Tipo de solución	¿Qué se logra?	Aplicación
Latón (Cu–Zn)	Zn en Cu	Sustitucional	Aumenta resistencia y dureza respecto del Cu puro	Grifería, válvulas,
Acero (Fe–C)	C en Fe	Intersticial	Incrementa fuertemente la resistencia del hierro	Aceros
Al–Mg	Mg en Al	Sustitucional	Aumenta resistencia manteniendo baja densidad	Estructuras aeronáuticas



3) Endurecimiento por disminución de tamaño de grano



De un grano a otro, la orientación de los cristales cambia

Las dislocaciones al llegar al límite de grano deben saltar al grano continuo

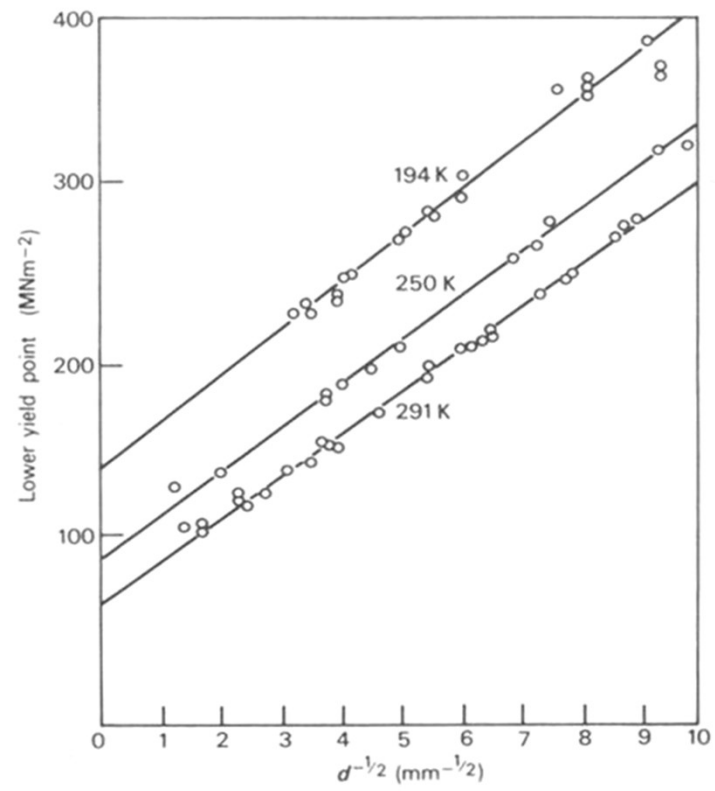
Se dificulta su movimiento

Endurecimiento por disminución de tamaño de grano

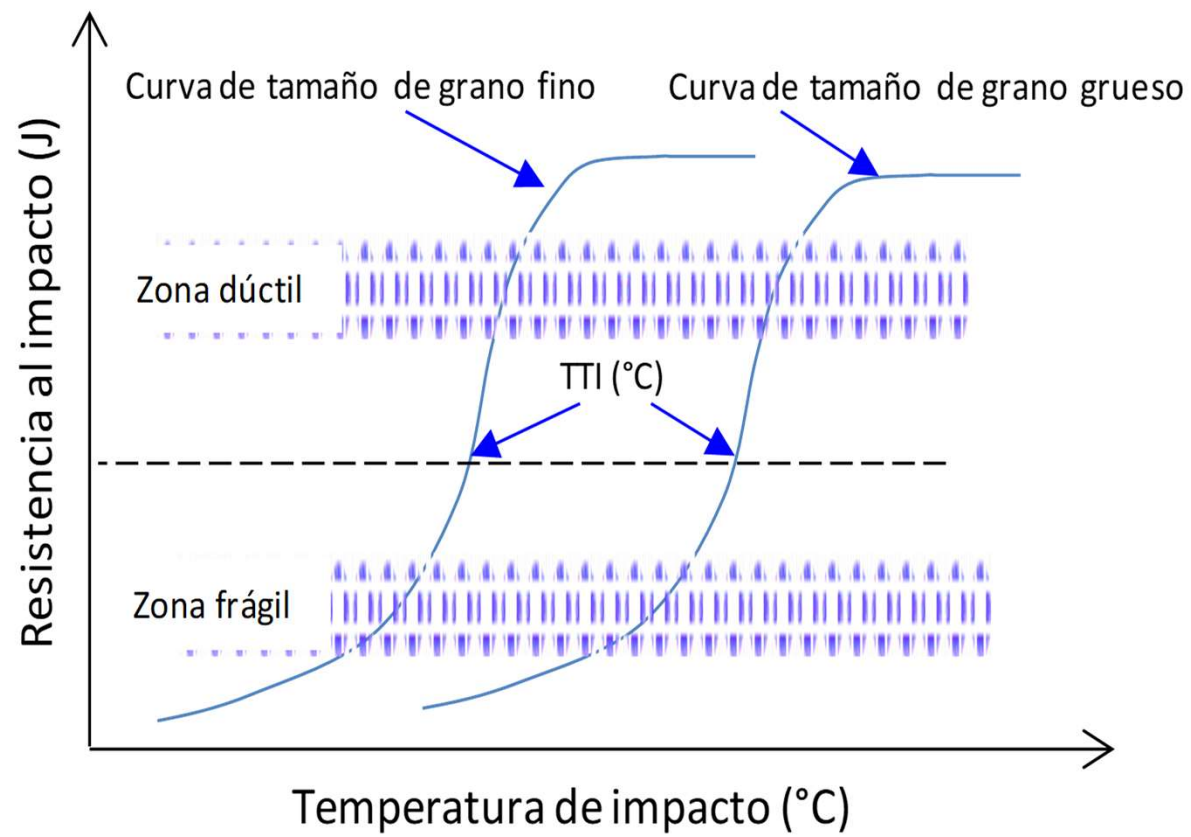
Ley de Hall y Petch: $\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$

Importancia de este mecanismo

El único mecanismo de endurecimiento que aumenta la resistencia mecánica sin afectar la tenacidad

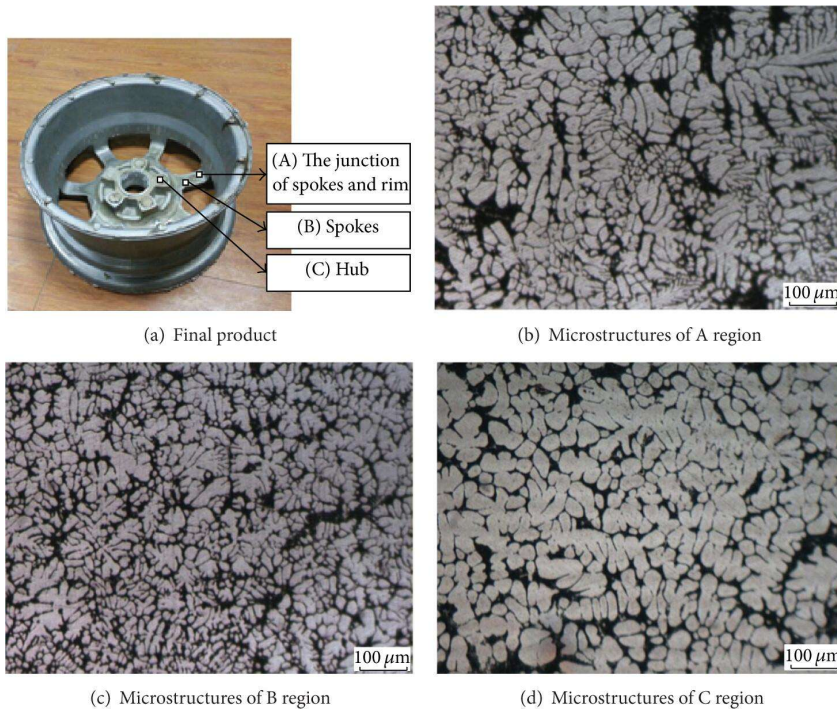


$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$



Ejemplos

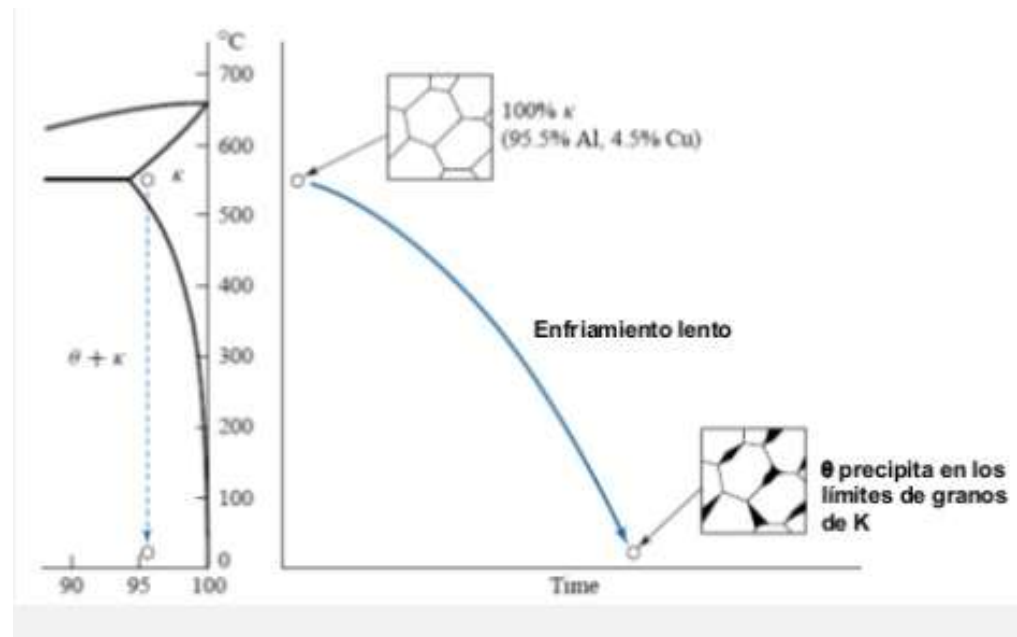
Llantas de aleación

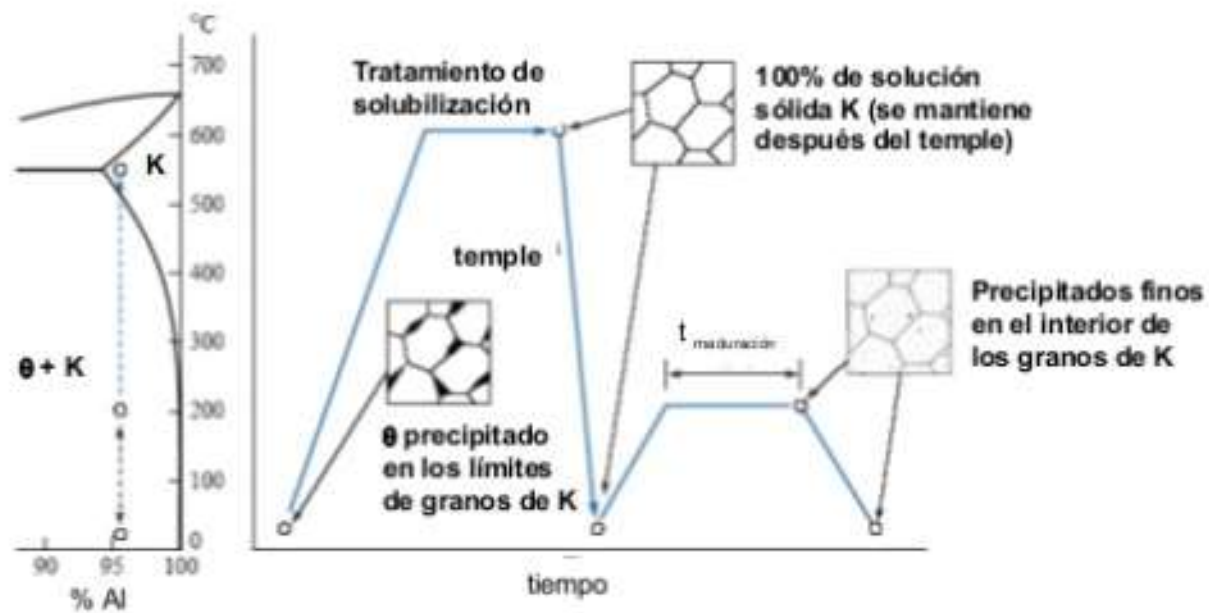


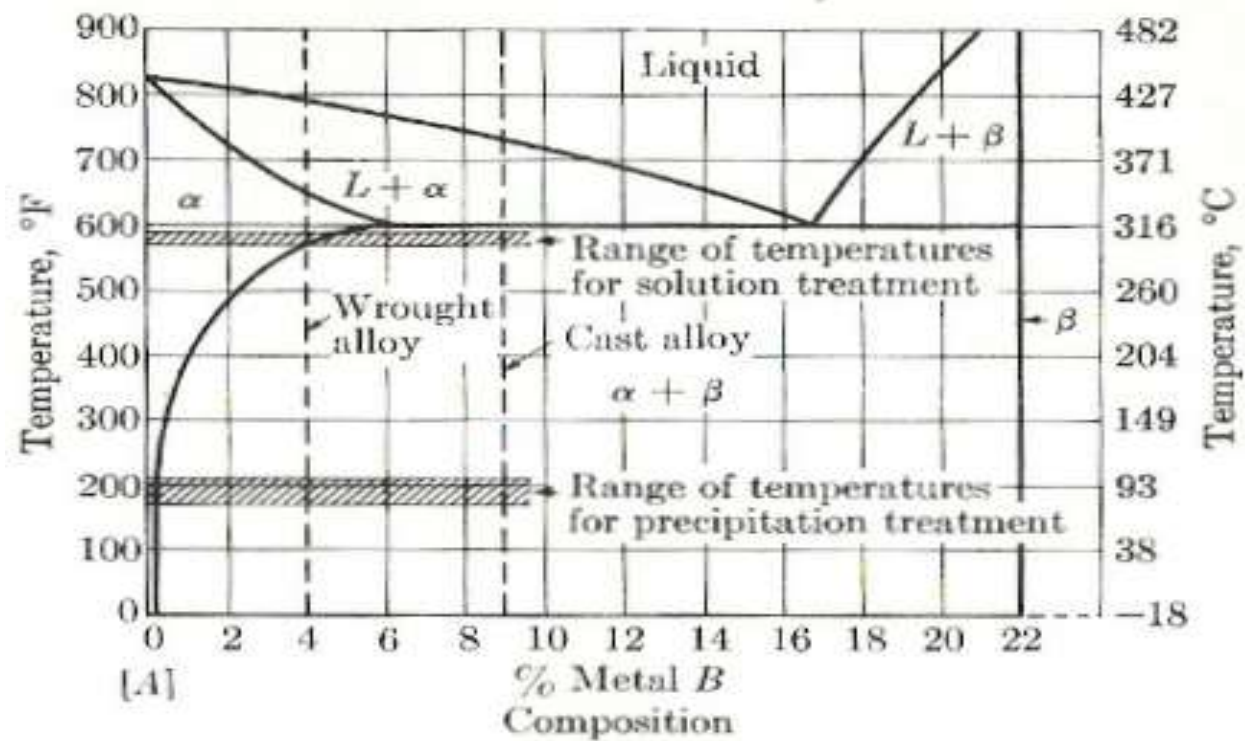
Caños de gasoductos



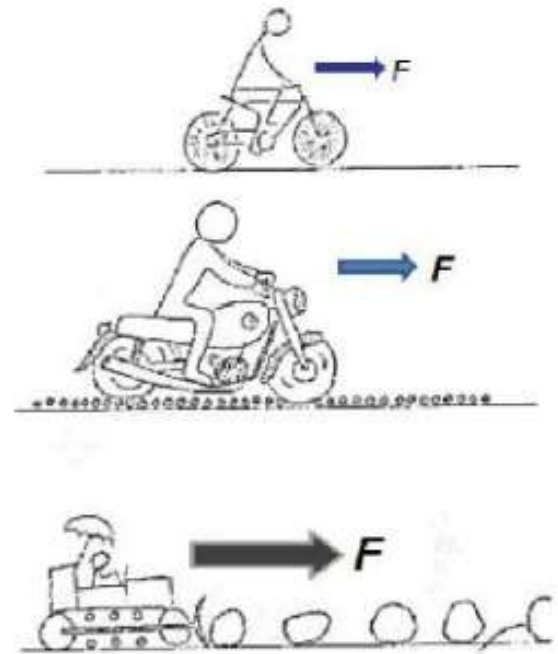
4) Endurecimiento por precipitación de segunda fase







El objetivo del envejecimiento es crear en una aleación tratada térmicamente, una dispersión densa y fina de partículas precipitadas en una matriz de metal deformable. Las partículas precipitadas actúan como obstáculos del movimiento de las dislocaciones y, así, refuerzan la aleación tratada térmicamente.



Ejemplo

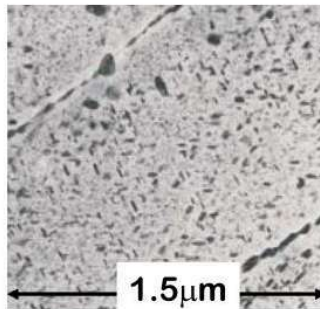
Las aleaciones de aluminio endurecibles por precipitación se utilizan ampliamente en estructuras aeronáuticas

- Internal wing structure on Boeing 767



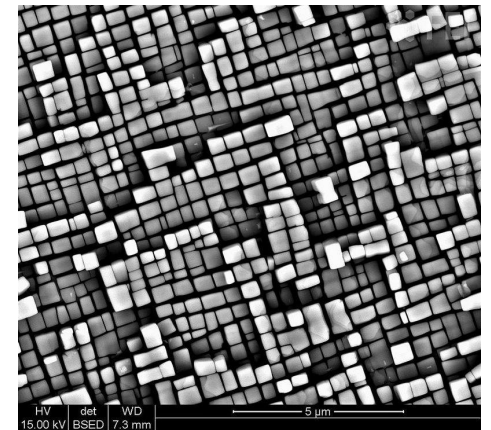
Adapted from Fig. 11.0, *Callister 5e*.

- Al is strengthened with precipitates formed by alloying.



Adapted from Fig. 11.24, *Callister 6e*.

Superalaciones de Ni



Superalaciones base Ni

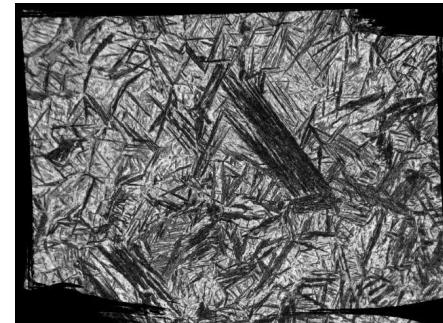
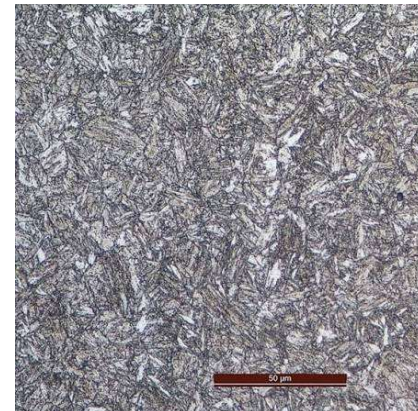
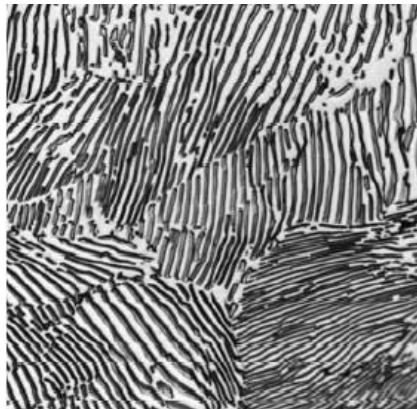
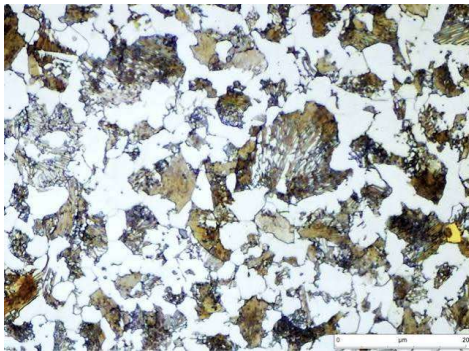
Álabes de turbina Matriz γ (Ni) + precipitados γ' (Ni_3Al)

Obstaculización de dislocaciones

Alta resistencia a temperaturas elevadas.

5) ENDURECIMIENTO POR TRANSFORMACIÓN DE FASE

Una transformación de la fase/microestructura del material. El material no cambia su composición química: cambia su estructura cristalina/microestructura



Ejemplo

