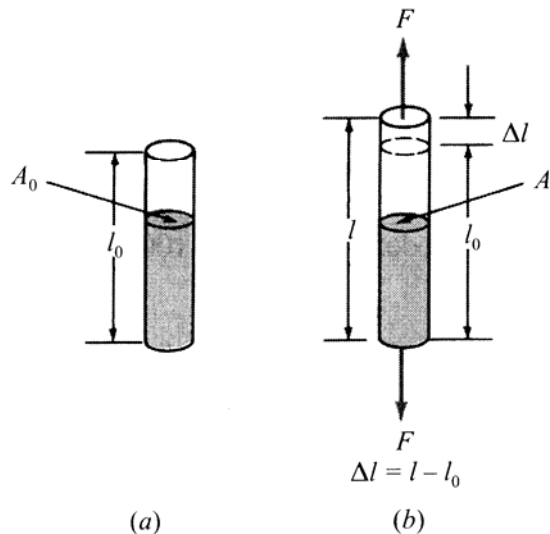


# Tema 2a. Propiedades mecánicas

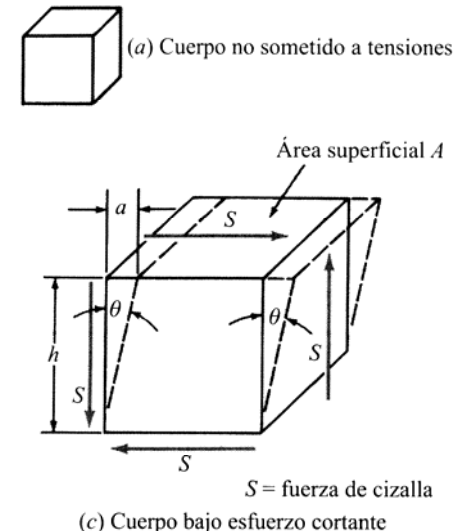
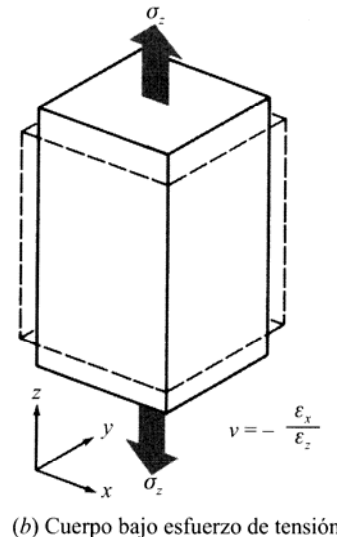
1. Deformación elástica y plástica: generalidades
2. Propiedades y mecanismos relacionados con la deformación plástica
  - Ensayo de tracción-flexión. Endurecimiento y reblandecimiento
  - Ensayo de dureza
  - Ensayo de termofluencia
3. Propiedades y mecanismos relacionados con la fractura
  - Ensayo de impacto
  - Ensayo de fractura
  - Ensayo fatiga

# Deformación elástica y plástica

- Deformación elástica: al eliminar la tensión aplicada sobre el material, éste vuelve a su longitud inicial. Los átomos del material se desplazan momentáneamente de sus posiciones de equilibrio
- Deformación plástica: al eliminar la tensión aplicada sobre el material, éste **no** recupera sus dimensiones iniciales. Los átomos del material se desplazan definitivamente a otras nuevas posiciones



Deformación uniaxial,  $\varepsilon = \Delta l / l_0$   
 Tensión o esfuerzo uniaxial,  $\sigma = F / A_0$

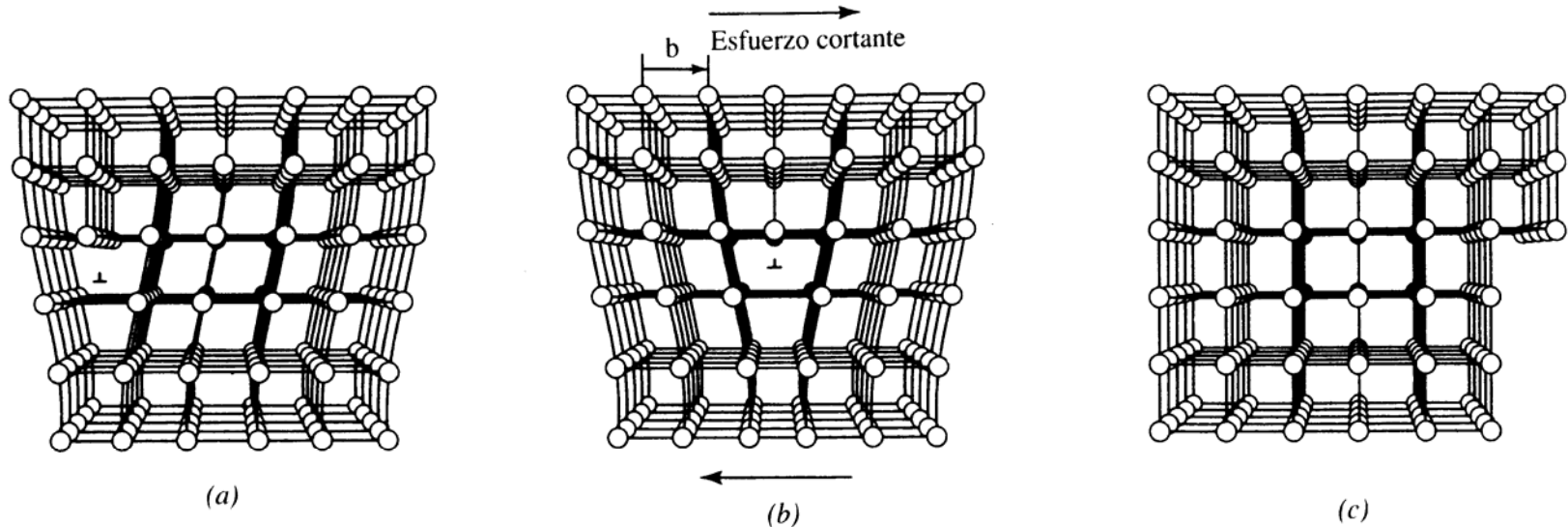


Deformación cortante,  $\gamma = a / h = \tan \theta$   
 Esfuerzo cortante o cizalladura,  $\tau = S / A_0$

# Mecanismo de la deformación plástica

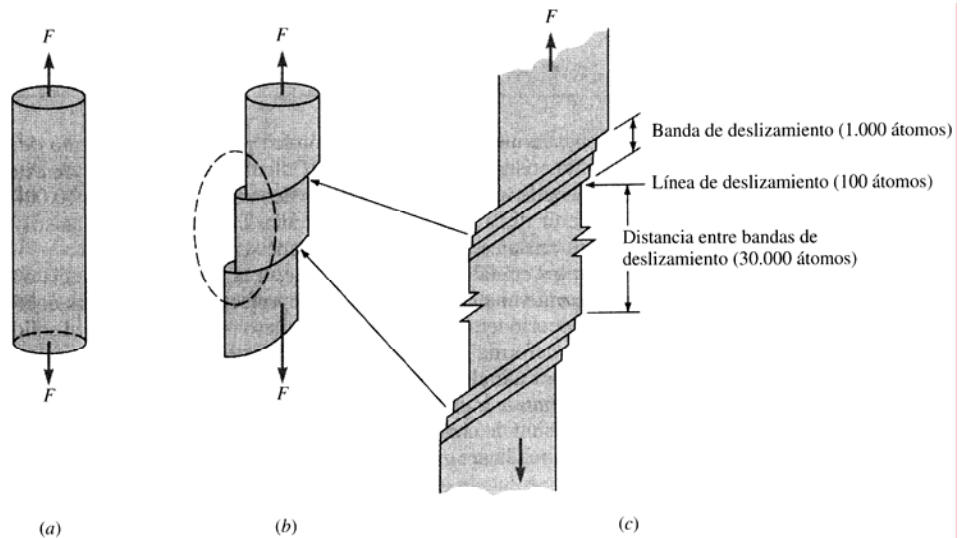
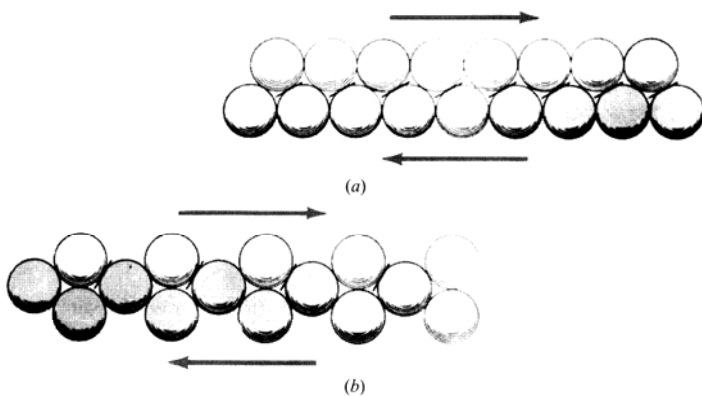
## Deslizamiento de las dislocaciones

- 1) Al aplicar un esfuerzo cortante, la dislocación existente puede romper los enlaces atómicos de los planos atómicos contiguos (en un sentido)
- 2) Los planos con enlaces rotos se desplazan ligeramente y en sentido contrario para reestablecer sus enlaces atómicos con otros planos
- 3) Esta recombinación hace que la dislocación se desplace por el material
- 4) Finalmente el material queda deformado.



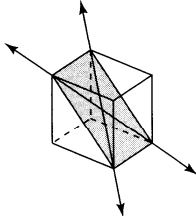
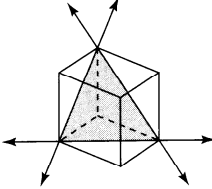
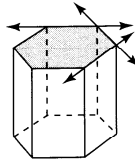
# Factores determinantes en el deslizamiento de dislocaciones

1. Las direcciones de deslizamiento usuales son las direcciones *compactas* del material (distancia menor entre átomos)
2. Los planos de deslizamiento son los de mayor empaquetamiento atómico del material y con mayor distancia interplanar
3. El tipo de enlace interatómico: enlaces covalente o iónico (muy intensos) impiden el deslizamiento de dislocaciones; enlace metálico (débil) facilita el deslizamiento de dislocaciones.



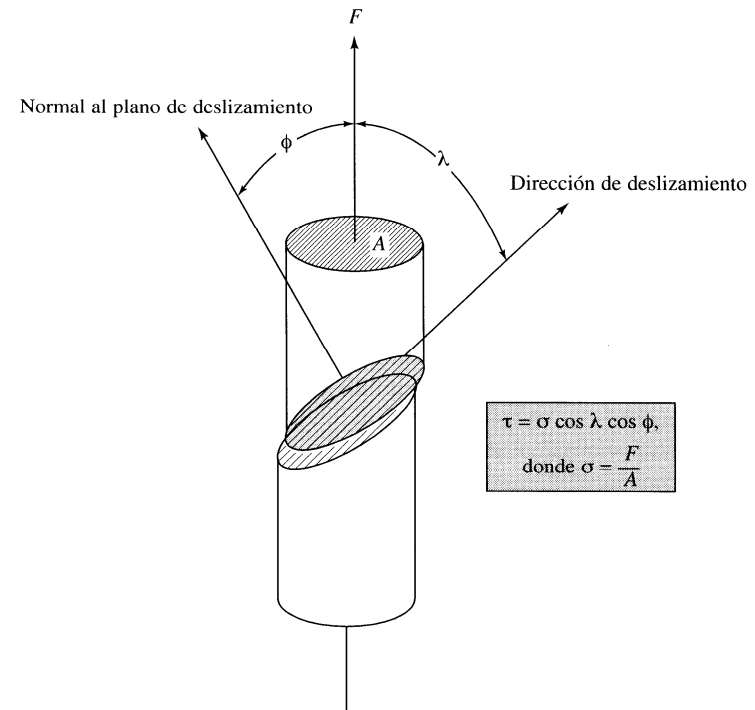
# Sistemas cristalográficos de deslizamiento

Sistema de deslizamiento: combinación de un plano compacto y de una dirección cristalográfica *compacta* sin tensiones locales incluida en dicho plano.

Estructura cristalina	Plano de deslizamiento	Dirección de deslizamiento	Número de sistemas de deslizamiento	Geometría de la celda unidad	Ejemplos
bcc	{110}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	$6 \times 2 = 12$		Fe- $\alpha$ , Mo, W
fcc	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	$4 \times 3 = 12$		Al, Cu, Fe- $\gamma$ , Ni
hcp	(0001)	$\langle \bar{2}0 \rangle$	$1 \times 3 = 3$		Cd, Mg, Ti- $\alpha$ , Zn

# Ley de Schmid para el deslizamiento de dislocaciones

- Sobre un material se aplica un esfuerzo cortante  $\tau = F/A$  cuya fuerza forma un ángulo  $\lambda$  respecto de cierta dirección de deslizamiento.
- El esfuerzo cortante efectivo o resultante a lo largo de dicha dirección de deslizamiento se debe sólo a la componente de la fuerza  $F_R = F \cos \lambda$ .
- La sección real de la muestra sobre la que actúa es  $A_R = A / \cos \phi$ .
- Por ello, el esfuerzo cortante efectivo o resultante a lo largo de dicha dirección de deslizamiento será  $\tau_R = F_R / A_R = F \cos \lambda / (A / \cos \phi) = (F/A) \cos \lambda \cos \phi = \tau \cos \lambda \cos \phi$ .
- Si  $\tau_R > \tau_C$ , donde  $\tau_C$  es el esfuerzo cortante crítico (característico del material), la dislocación se desplazará dando lugar a la deformación.



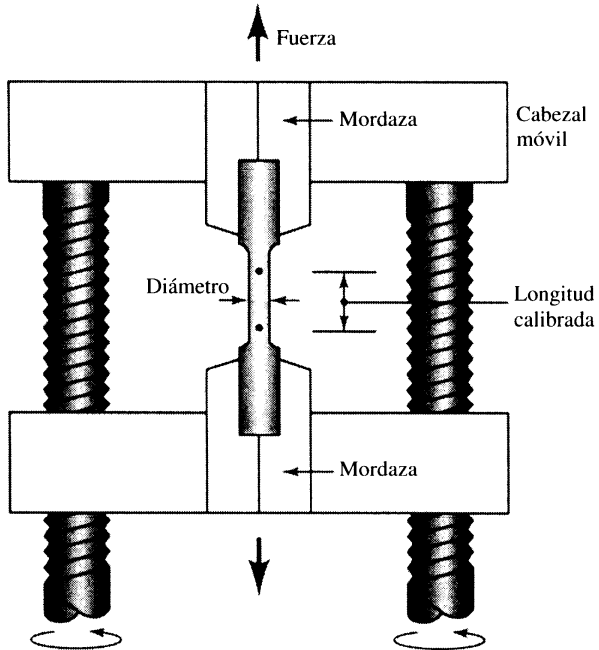
# Importancia de las dislocaciones y su deslizamiento. Implicaciones

1. El deslizamiento de las dislocaciones explica por qué la resistencia mecánica de un metal es menor de lo esperable (enlace metálico no direccional) y pueden deformarse (materiales dúctiles)
2. Los materiales iónicos y cerámicos ofrecen una alta resistencia al deslizamiento
  - Fuertes enlaces iónicos o covalentes
  - Repulsión electrostática durante el deslizamiento/enlace direccional
  - Materiales no dúctiles o frágiles
3. El deslizamiento proporciona ductilidad al material (facilidad de deformación). De no existir la posibilidad de deslizamiento, el material sería frágil
4. Controlar el movimiento de las dislocaciones (introducir impurezas, defectos, solidificación, etc...) permite controlar las propiedades mecánicas del material

**Endurecimiento del material:** creación de impedimentos al deslizamiento de las dislocaciones

Fronteras de grano-Soluciones sólidas-Trabajo del material en frío-...

# Ensayos de tracción y de flexión (sistemas experimentales).



Ensayo de tracción

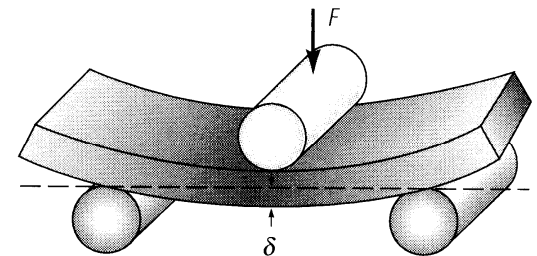
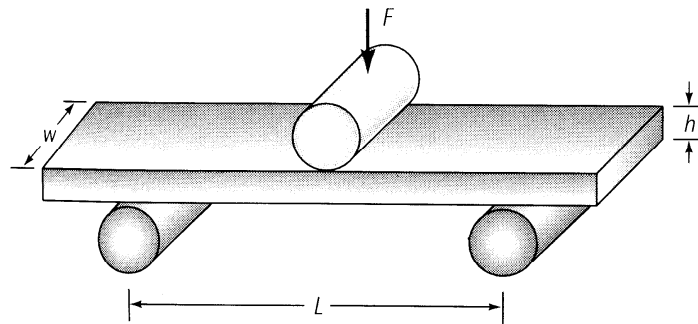
Módulo de elasticidad o de Young =  $\sigma/\epsilon$

Deformación plástica

Ensayo de flexión (materiales frágiles)

Resistencia a la flexión =  $3F \cdot L / (2wh^2)$

Módulo en flexión =  $L^3 \cdot F / (4wh^3d)$





# Ensayo de tracción. Diagrama tensión-deformación (I)

Algunos parámetros importantes:

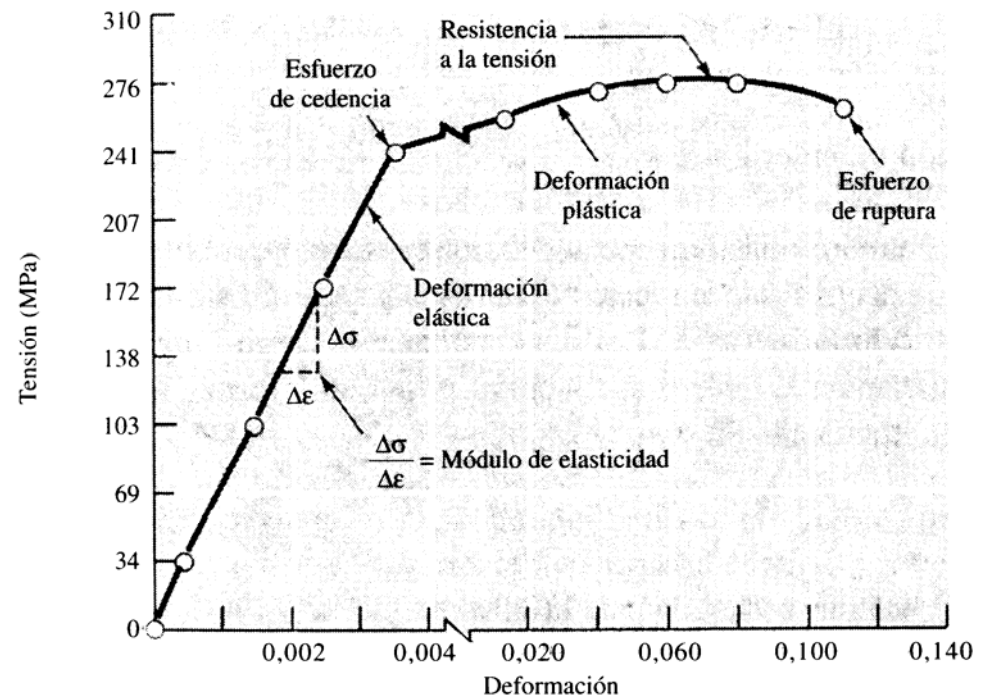
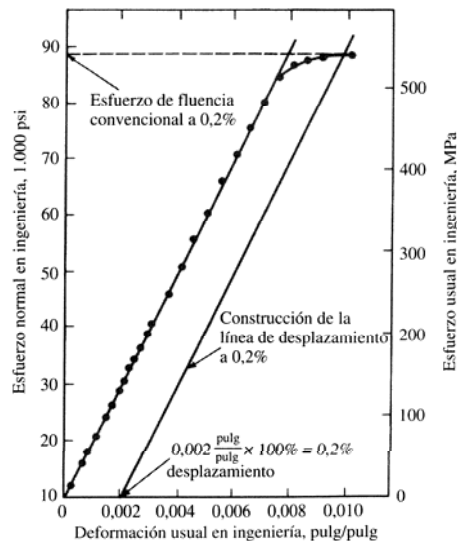
Regiones elástica y plástica.

Límite elástico. Módulo de Young

Resistencia máxima a la tensión

Módulo de resiliencia

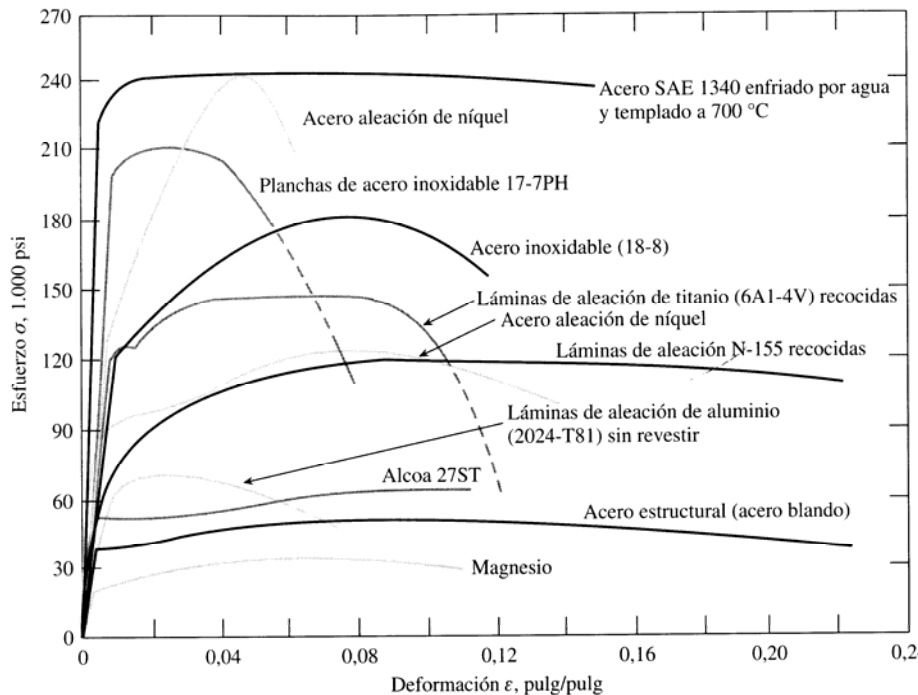
Módulo de Poisson,  $\mu = -\epsilon_{\text{lateral}}/\epsilon_{\text{longitudinal}}$



$$\% \text{ elongacion} = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad \% \text{ reduccion de area} = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100\%$$

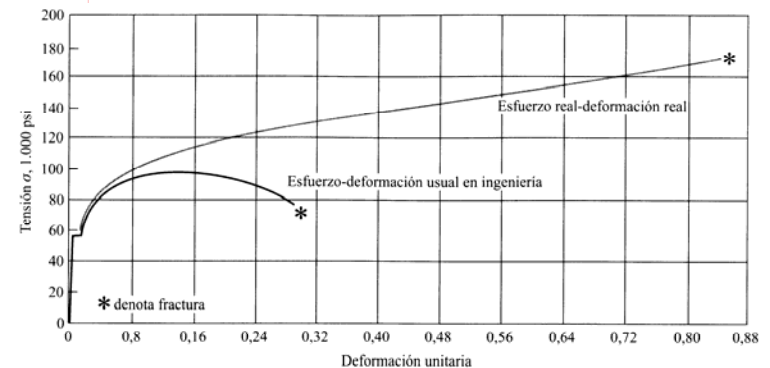
# Diagrama tensión-deformación (II)

## Ejemplos en tipo de materiales (metálicos)



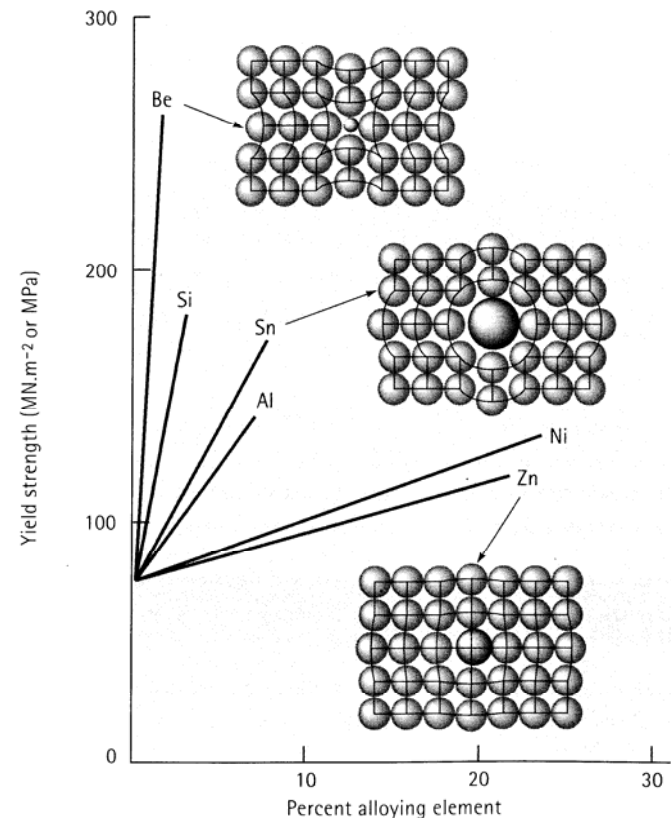
Diferencia entre los diagramas de tensión-deformación (estricción):

- a) real:  $\sigma_r = F/A$ ,  $\epsilon_r = \ln(l/l_0)$
- b) Ingenieril:  $\sigma_i = F/A_0$ ,  $\epsilon_r = \Delta l/l_0$

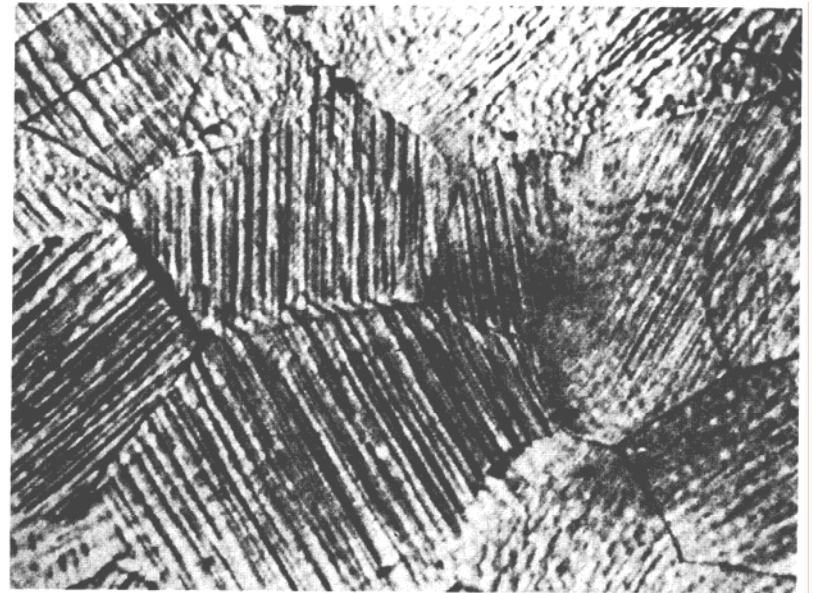
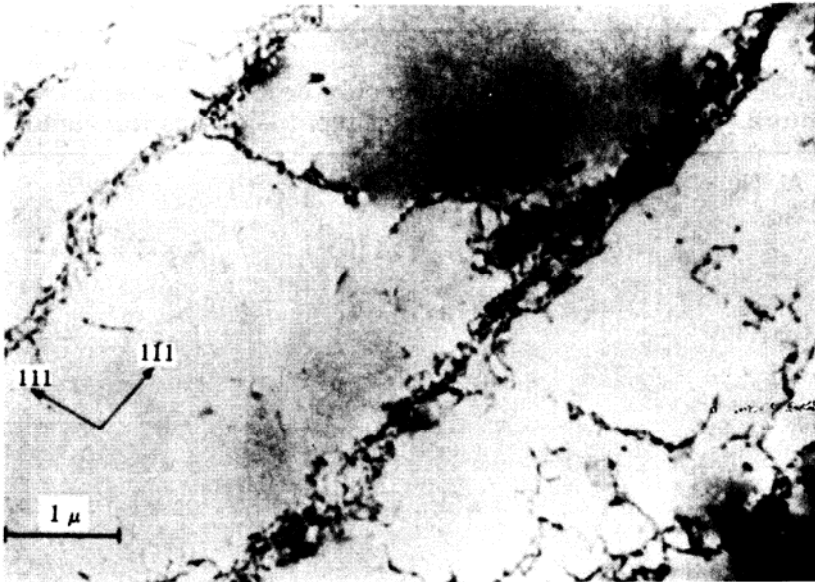


# Mecanismos de endurecimiento (I)

- Fronteras de grano: actúan como barreras al deslizamiento de las dislocaciones (mayor resistencia y endurecimiento del material)
  - Menor tamaño del grano-mayor número de granos y fronteras de grano en el material----- Mayor resistencia y dureza del material
- Soluciones sólidas
  - Factor de tamaño relativo: distorsiones creadas por los diferentes tamaños atómicos
  - Orden de corto alcance: diferentes estructuras de enlace



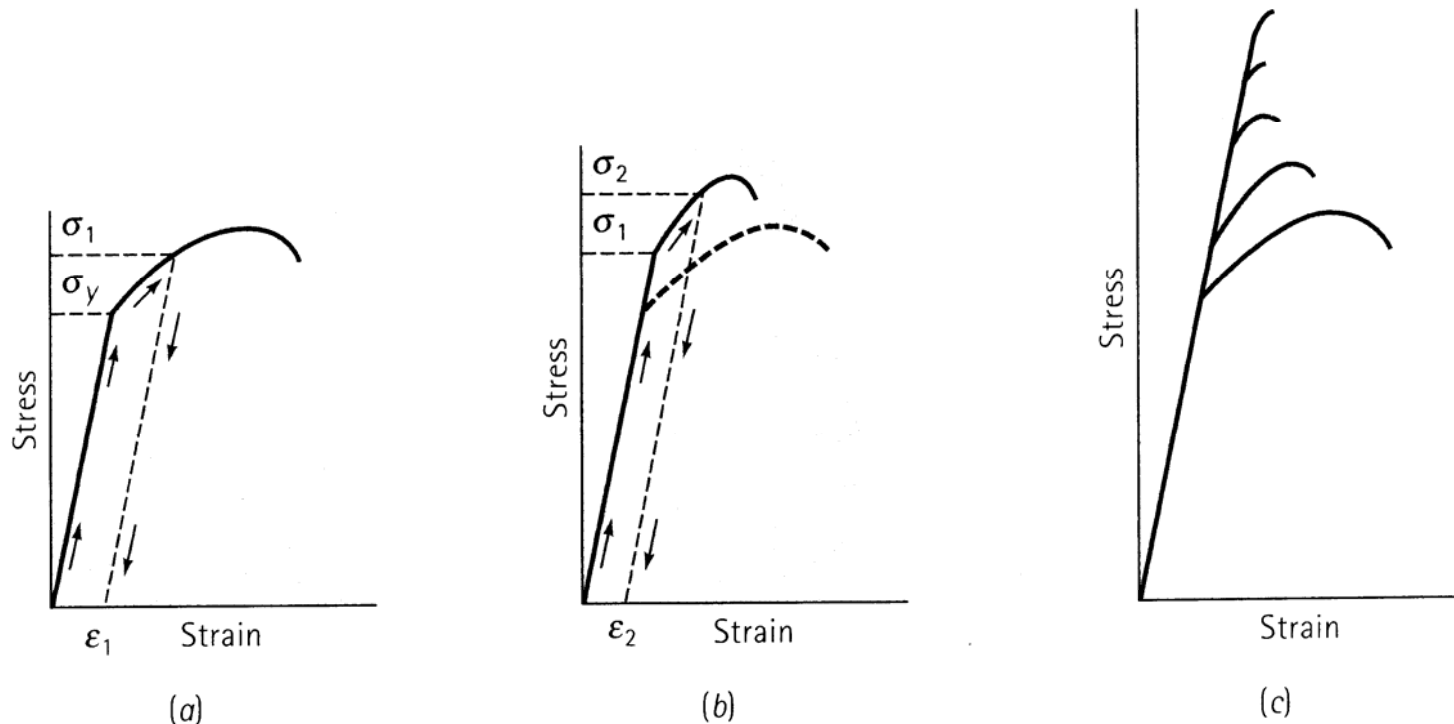
## Mecanismos de endurecimiento (II)



# Mecanismos de endurecimiento (III)

- Trabajo en frío: al deformar un material, se aumenta el número de dislocaciones y éstas se desplazan con mayor dificultad

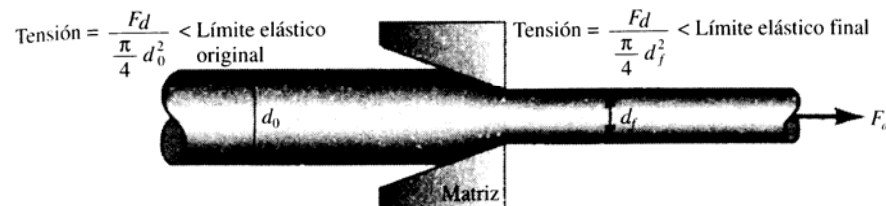
**Aumento de la resistencia o endurecimiento del material**



# Mecanismos de endurecimiento (IV)

Ventajas y desventajas del trabajo en frío

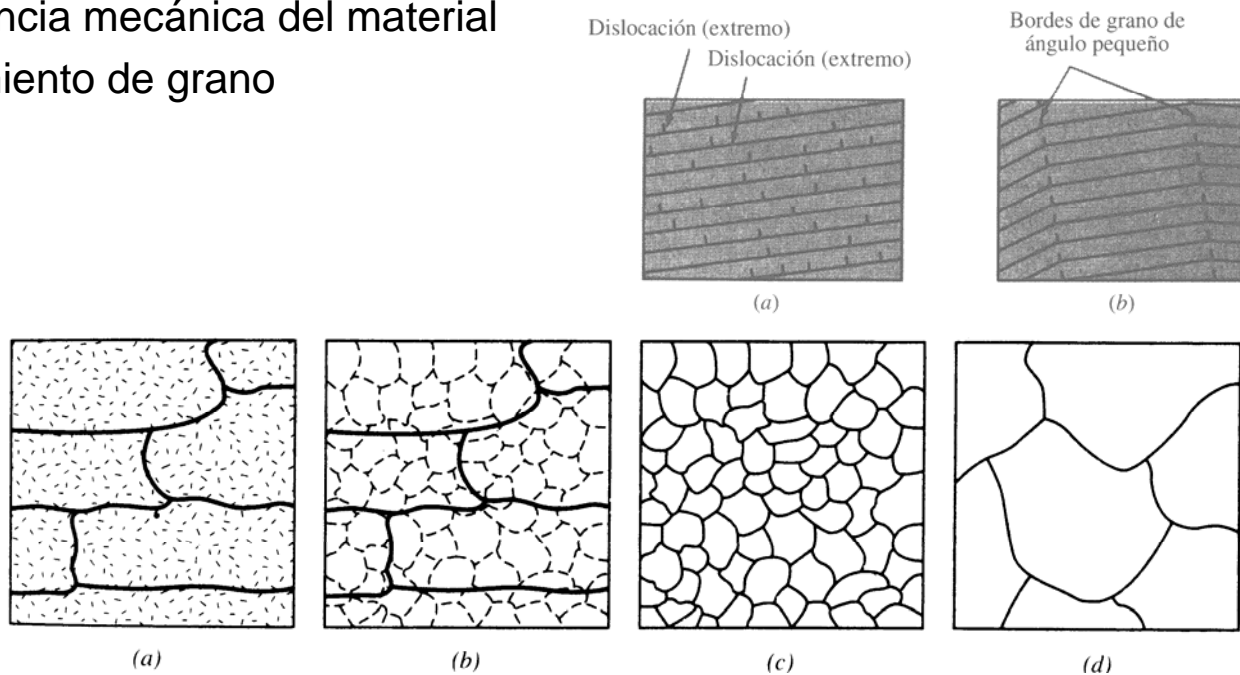
1. Endurece y moldea el material simultáneamente
2. Acabados superficiales (y de otros tipos) excelente
3. Método económico para fabricar piezas metálicas
4. Grado reducido de trabajo en frío para materiales frágiles (Mg, pocos sistemas de deslizamiento en la red hcp)
5. Disminución de la ductilidad del material moldeado
6. Generación de tensiones residuales (beneficioso o no)
7. Algunas técnicas de deformación sólo pueden aplicarse por medio de un trabajo en frío muy controlado (véase el ejemplo).



# Mecanismos de reblandecimiento (I): recocido

Elimina las tensiones residuales (recocido a baja temperatura), reblandece y aumenta la ductilidad del material (contrario al trabajo en frío).

- 1) Recuperación: calentamiento por debajo de la recristalización, reordenación de las dislocaciones (estructura subgranular polygonizada) y reducción de las tensiones residuales. Mejora de las propiedades eléctricas.
- 2) Recristalización: Formación de granos en los bordes de la celda polygonizada. Eliminación de dislocaciones. Aumento de la ductilidad y disminución de la resistencia mecánica del material
- 3) Crecimiento de grano



# Mecanismos de reblandecimiento (II): recocido

## Algunas consideraciones sobre el recocido

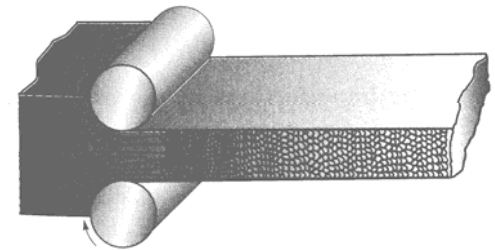
1. La temperatura de recrystalización disminuye al incrementar la cantidad de trabajo en frío (aumento de dislocaciones)
2. Un tamaño inicial de grano pequeño disminuye la temperatura de recrystalización (mayor número de puntos donde favorecer la nucleación)
3. Al aumentar el tiempo de recocido se reduce la temperatura de recrystalización (más tiempo para la nucleación y crecimiento de los granos recrystalizados)
4. El tamaño final del grano recrystalizado es menor cuanto mayor sea la deformación inicial (menor temperatura de recrystalización)
5. Los metales puros se recrystalizan a temperaturas menores que las aleaciones
6. Las aleaciones con un punto de fusión alto tienen una temperatura de recrystalización mayor (la recrystalización es un proceso controlado por la difusión).



# Trabajo en caliente: moldeado y recristalización simultánea

Deformación plástica del material (moldeado) a una temperatura superior a la de recristalización: durante el trabajo en caliente el material se moldea y cristaliza continuamente (recristalización dinámica)

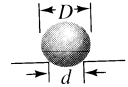

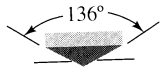
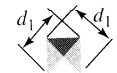
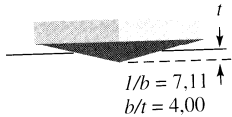
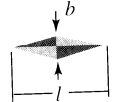
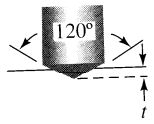

- a) Deformación plástica ilimitada durante el trabajo en caliente (ideal para piezas grandes y con tamaño final de grano muy fino)
- b) Eliminación de las imperfecciones (porosidades, diferencias de composición, etc...)
- c) Estructura final del material anisotrópica (gradientes térmicos, granos fibrosos en la dirección del laminado,...)
- d) Peor acabado superficial y precisión que el trabajo en frío



# Ensayos de dureza: sistemas experimentales y propiedades.

- Se utilizan para medir la resistencia de la superficie de un material a ser deformado

**TABLA 7.13 TIPOS COMUNES DE GEOMETRÍAS DEL ENSAYO DE DUREZA**

Ensayo	Penetrador	Forma de la indentación		Carga	Expresión para el índice de dureza
		Vista lateral	Vista superior		
Brinell	Esfera de 10 mm de acero o de carburo de wolframio			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D \left[ D - \sqrt{D^2 - d^2} \right]}$
Vickers	Pirámide de diamante			P	$VHN = 1,72P/d_1^2$
Microdureza Knoop	Pirámide de diamante			P	$KHN = 14,2P/l^2$
Rockwell	A } C } D } Cono de diamante			60 kg 150 kg 100 kg	$\left. \begin{matrix} R_A = \\ R_C = \\ R_D = \end{matrix} \right\} 100 - 500t$
	B } F } G } Esfera de acero de 1/6 de pulgada de diámetro			100 kg 60 kg 150 kg	$\left. \begin{matrix} R_B = \\ R_F = \\ R_G = \end{matrix} \right\} 130 - 500t$
	E } H } Esfera de acero de 1/8 de pulgada de diámetro			100 kg 60 kg	$\left. \begin{matrix} R_E = \\ R_H = \end{matrix} \right\}$

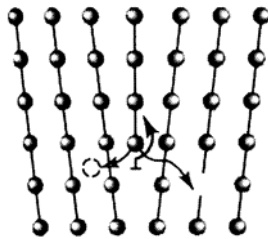
FUENTE: H. W. Hayden, W. G. Moffat y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. 3: *Mechanical Behaviour*; John Wiley & Sons, Inc.,

# Ensayo de deformación plástica dependiente del tiempo (termofluencia)

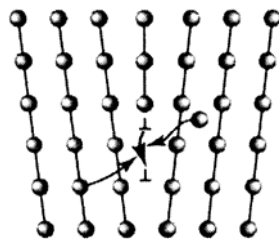
Al aplicar una tensión a un material a una temperatura elevada, éste puede deformarse y romperse incluso si la tensión es menor que el límite elástico a dicha temperatura.

La deformación a alta temperatura se denomina *termofluencia*

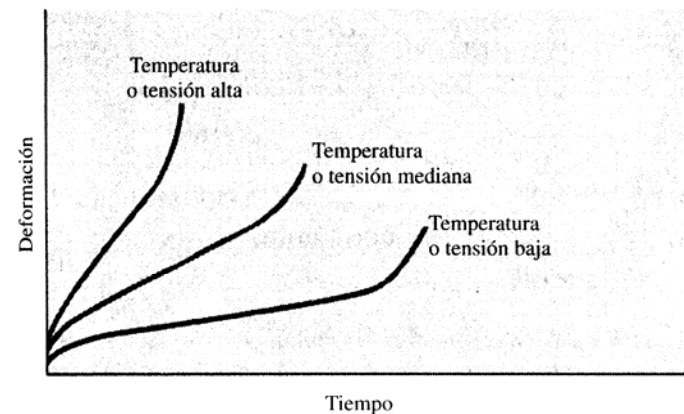
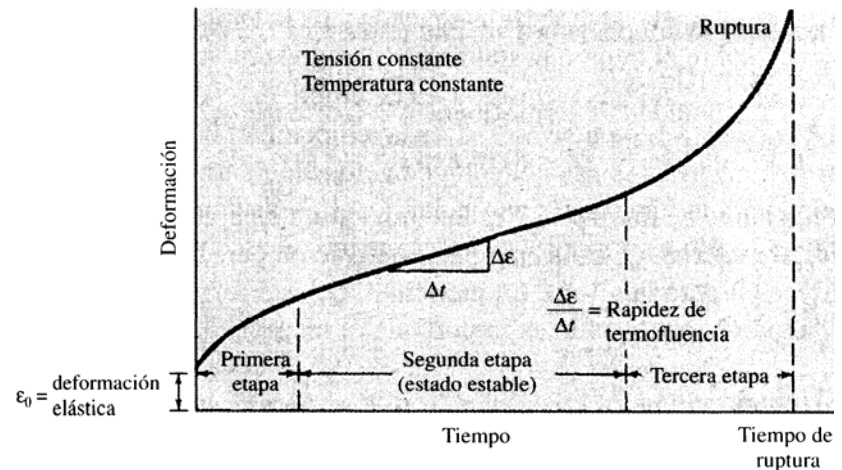
- Ascenso de las dislocaciones (alta temperatura)
- Dependencia de la termofluencia con el tiempo



(a)

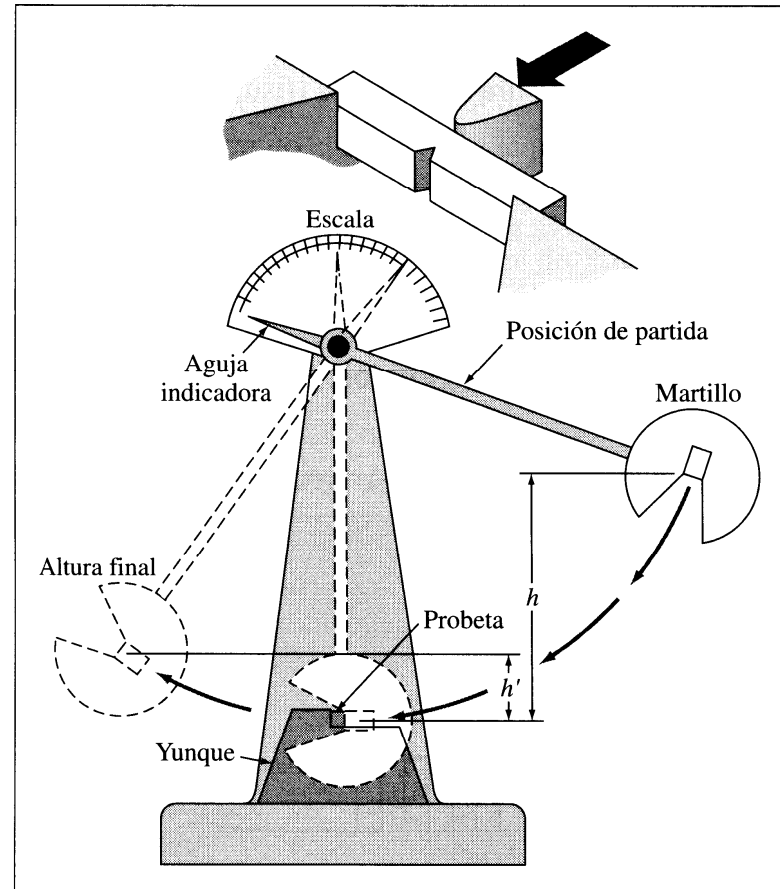


(b)



# Ensayos de impacto: sistema experimental y propiedades.

- Aplicación de un golpe súbito e intenso al material
- La velocidad de aplicación de la tensión o carga es extremadamente alta a diferencia de los ensayos de tracción y flexión
- Comportamiento distinto del material (más frágil)
- Sirve para medir la capacidad de un material para resistir una brusca carga de impacto (tenacidad).

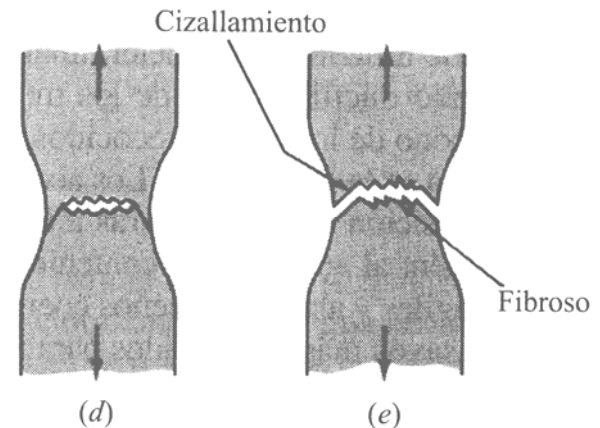
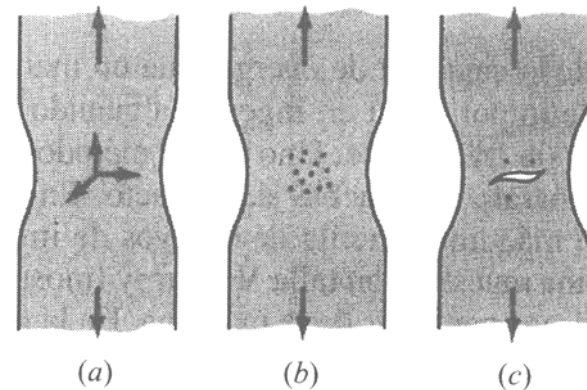


# Ensayo de fractura (I): experimento y mecanismos

Tenacidad a la fractura: capacidad de un material que contiene un defecto (fisura o grieta) para resistir una carga aplicada sin que el defecto progrese. Cantidad de energía que el material puede absorber antes de fracturar.

Tipos de fractura:

- Dúctil: aparece bajo intensas deformaciones plásticas. Fases: 1) estrangulamiento y microcavidades, 2) grieta y propagación y 3) ruptura
- Frágil: la fractura se propaga a lo largo de ciertos planos cristalográficos (materiales con pocos planos de deslizamiento). Bajas deformaciones plásticas



# Propiedades y mecanismos de la fractura (II)

Algunos factores relacionados con la tenacidad de un material:

- Defectos grandes reducen la máxima tensión admisible (menor tenacidad)
- La capacidad de deformación de un material es crítica (mayor ductilidad mayor tenacidad)
- Elementos más gruesos y rígidos dan lugar a una tenacidad menor que en los elementos delgados
- La tenacidad se reduce al aplicar rápidamente la tensión sobre el material
- La tenacidad aumenta al aumentar la temperatura
- Una estructura de granos pequeños mejora la tenacidad del material
- La tenacidad disminuye con el número de defectos puntuales y dislocaciones

# Ensayo de fractura por fatiga

Un material sometido durante largo tiempo a una tensión **cíclica** puede romperse (incluso estando dicha tensión por debajo del límite elástico)

Proceso de fractura por fatiga: (1) creación de la grieta en algún punto de la superficie del material (2) propagación de la grieta por la acción periódica de la tensión y (3) ruptura cuando la sección restante (no agrietada) es insuficiente para soportar la tensión aplicada

Factores que disminuyen la resistencia de un material a la fatiga:

- a) La presencia de concentradores de tensión (cualquier irregularidad en la sección de la pieza)
- b) Rugosidad superficial
- c) Estado superficial (endurecimiento, aislantes superficiales,...)
- d) Medio ambiente