

Deformación elástica, plástica y fatiga

Julio Alberto Aguilar Schafer

Resumen

→ Mecanismos de deformación

- Deformación Elástica
- Deformación Plástica
 - Dislocación de Borde
 - Dislocación Helicoidal
 - Dislocación Mixta
 - Macla

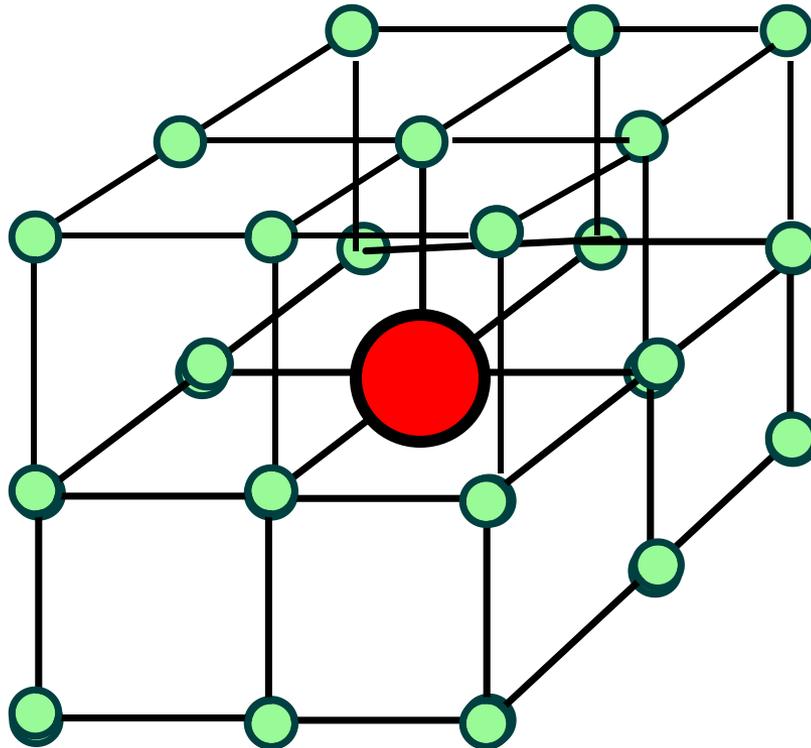
→ Mecanismos de endurecimiento

- Endurecimiento por disminución del tamaño de grano
- Endurecimiento por solución sólida (sust. o interst.)
- Endurecimiento por deformación en frío
- Endurecimiento por precipitación de segundas fases

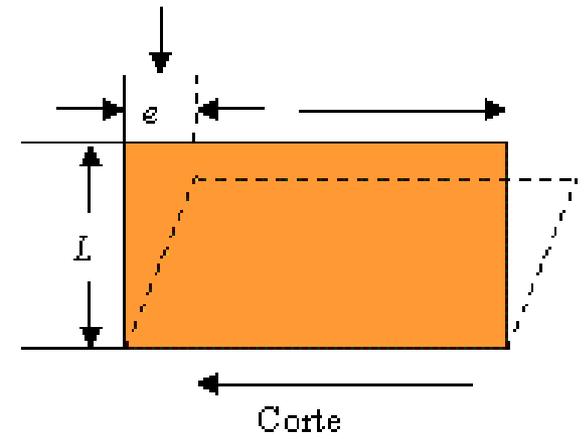
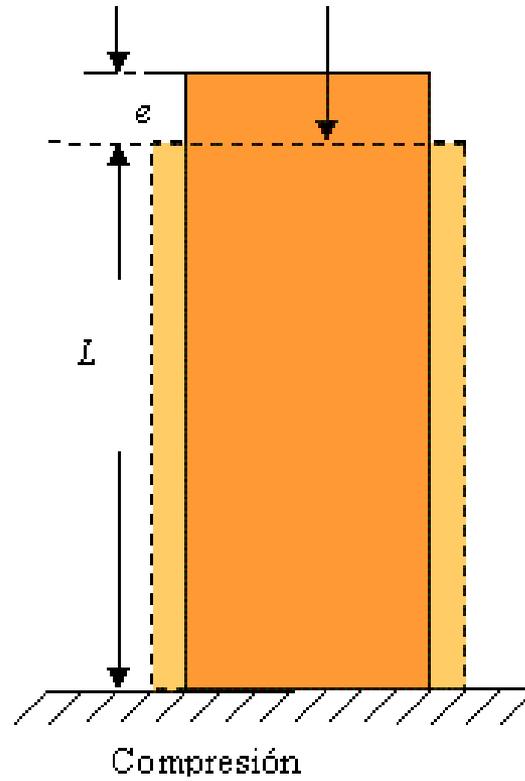
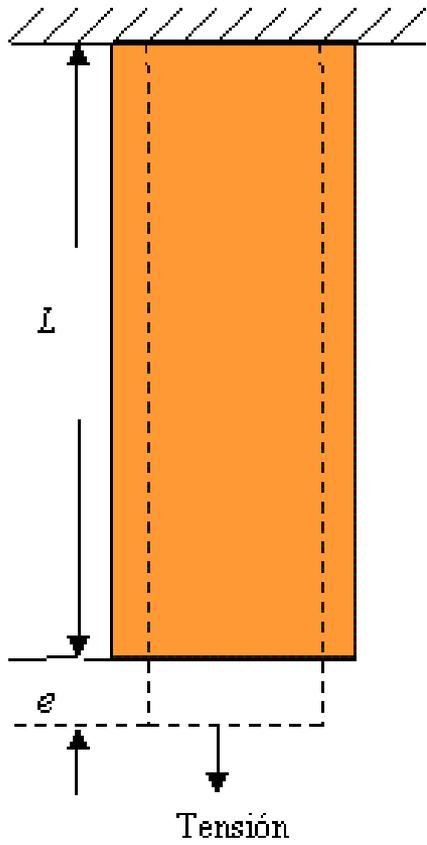
→ Mecanismos de Restauración

- Recuperación
- Recristalización
- Crecimiento del Grano

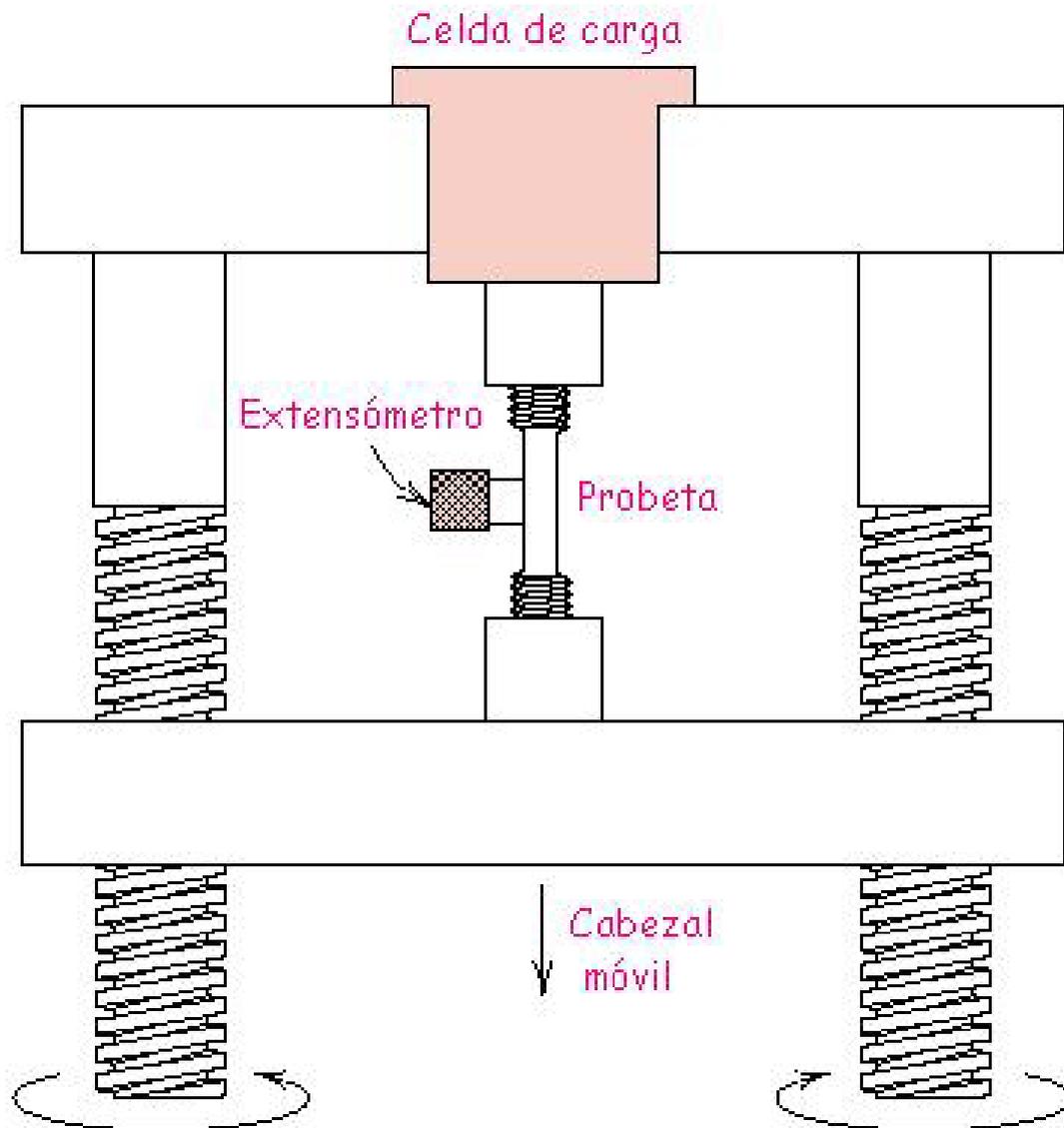
Las celdas unitarias no actúan de forma independiente, cada átomo en cada arista es compartido por el átomo de las aristas de cada celdas unitarias adyacente.



$$\frac{1}{8} \times 8 = 1$$



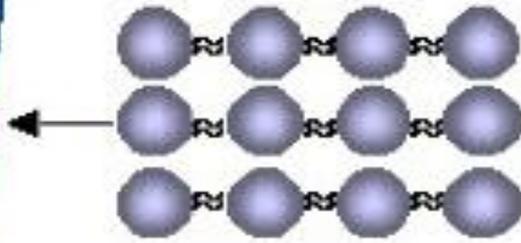
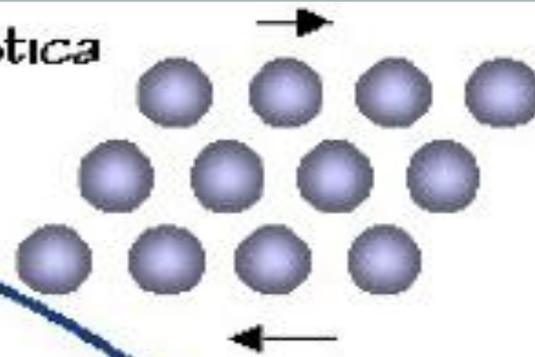
$e = \text{Deformación}$
 $\epsilon = \text{Deformación unitaria} = \frac{e}{L}$



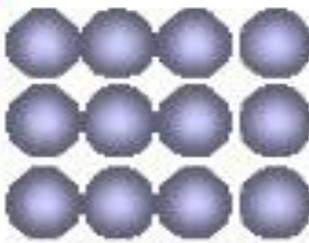
Máquina de Ensayo de Tracción.

Stress

Def. Plástica

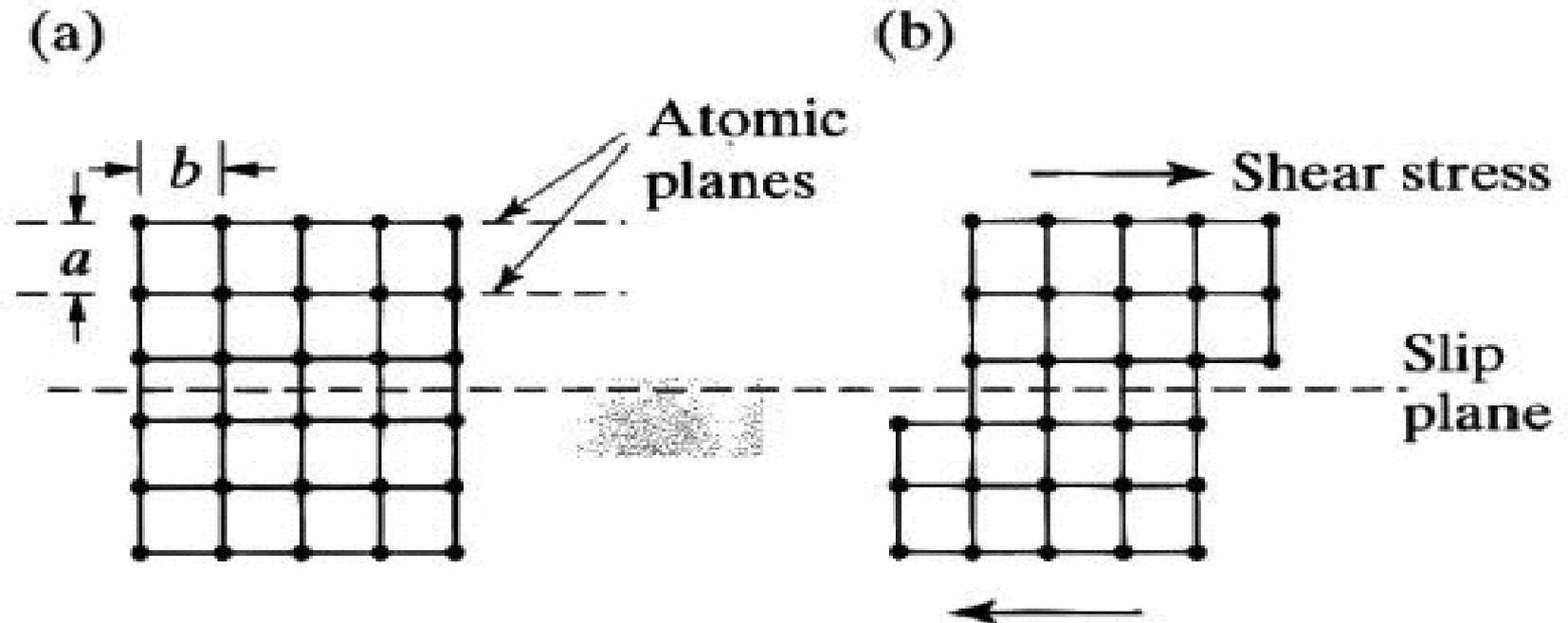
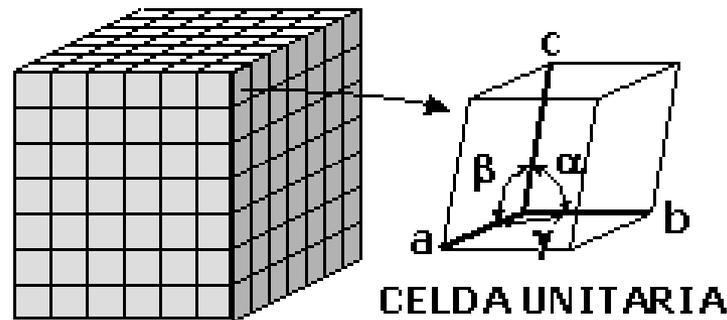


Def. Elástica



Strain

Defomación plástica



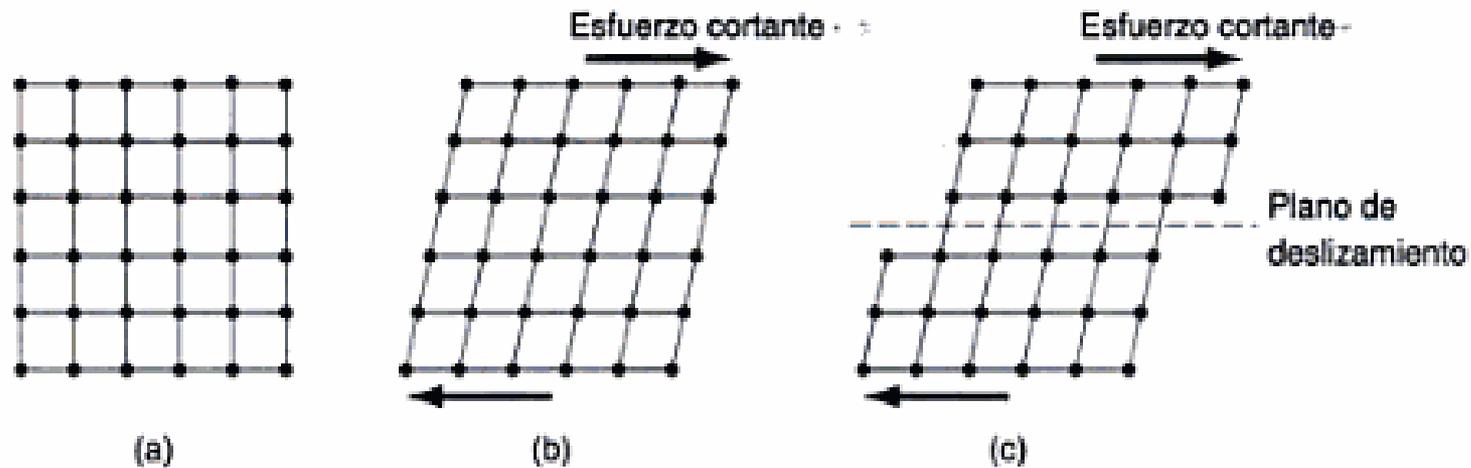
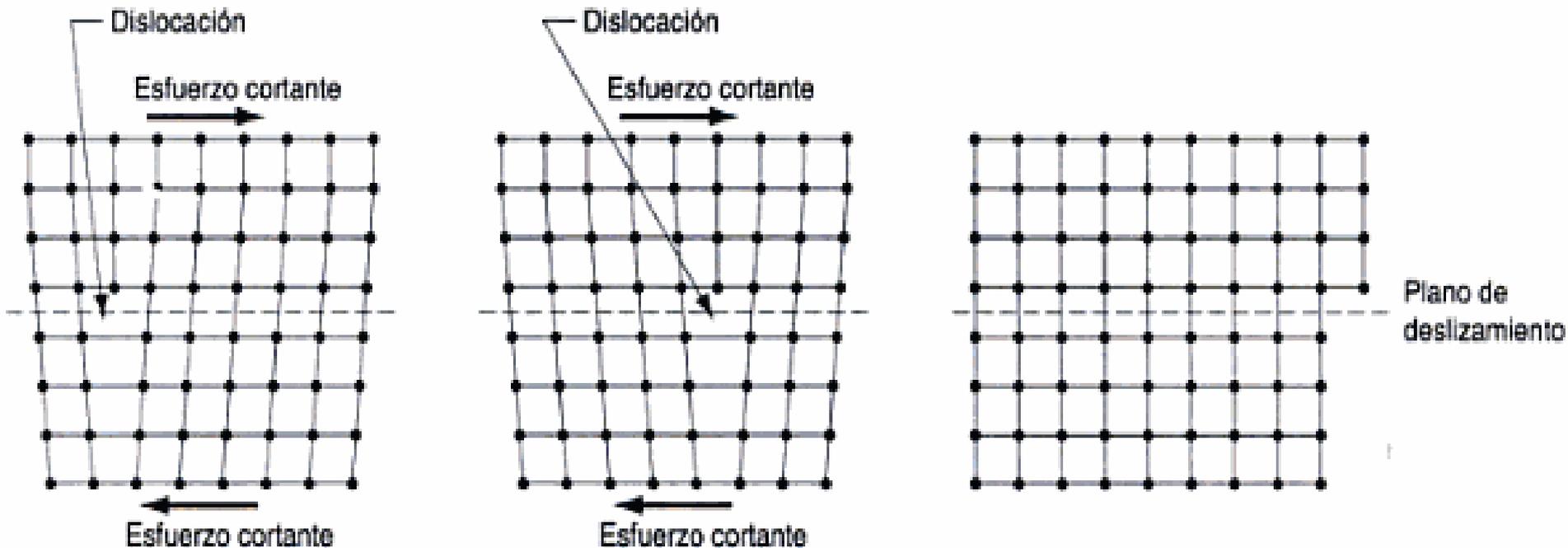
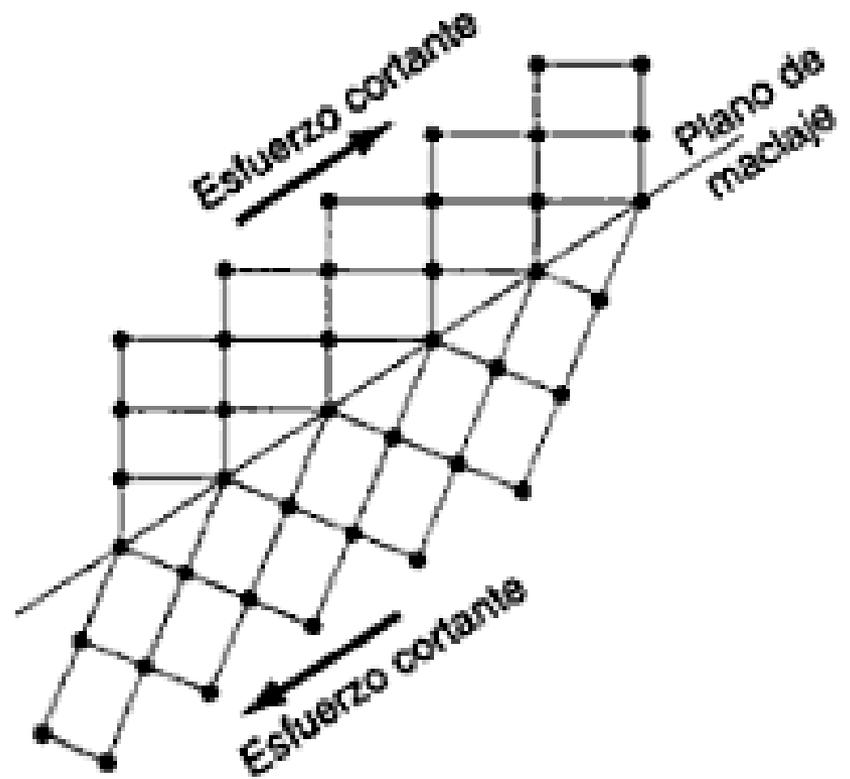
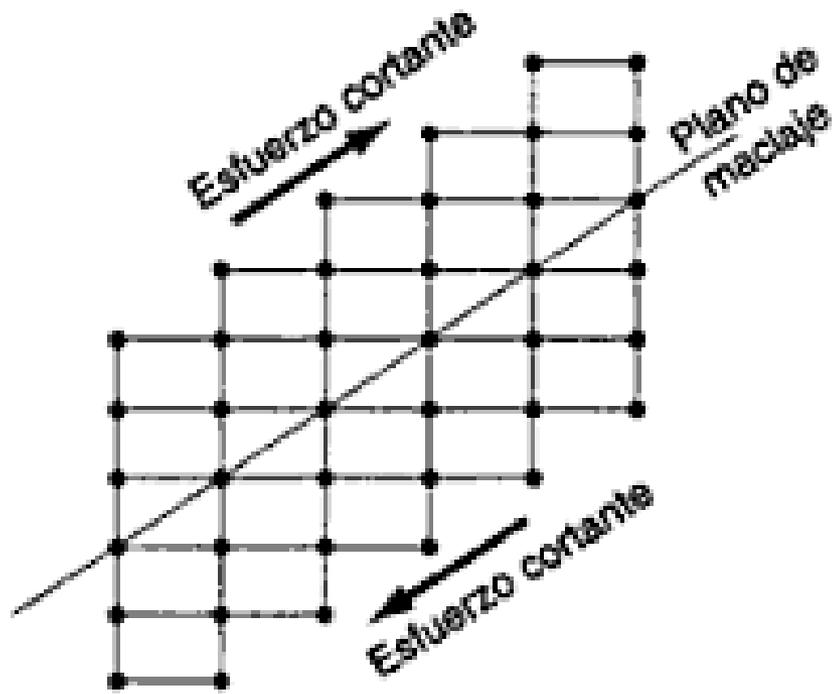
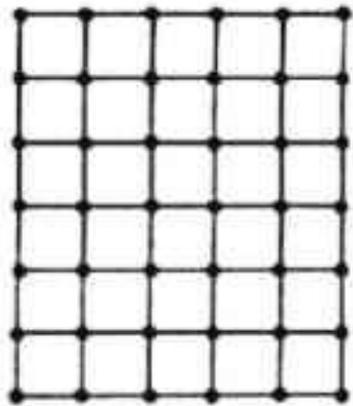


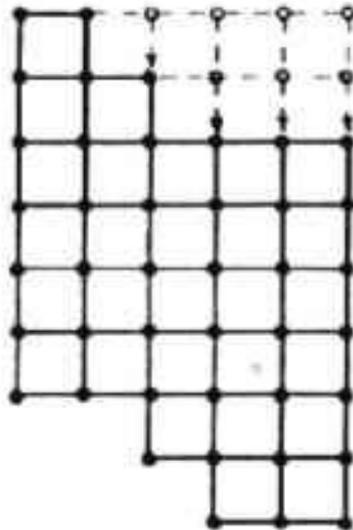
FIGURA 2.11 Deformación de una estructura cristalina: (a) retícula original; (b) deformación elástica sin cambio permanente en la posición de los átomos; y (c) deformación plástica en la cual los átomos de la retícula son forzados a tomar nuevas posiciones.







GRANOS SIN DEFORMACIÓN



GRANOS DEFORMADOS

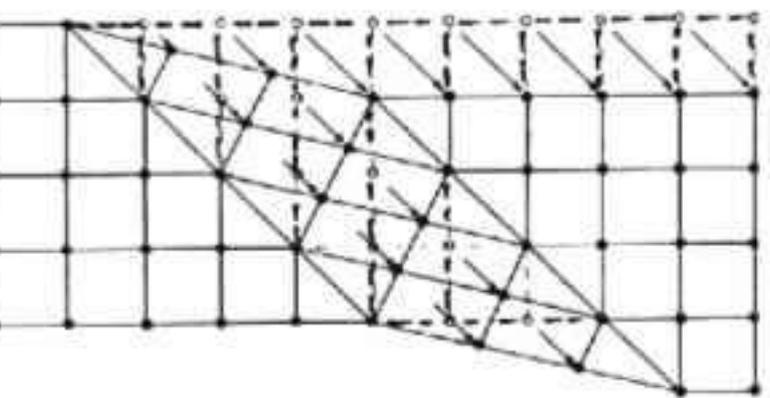
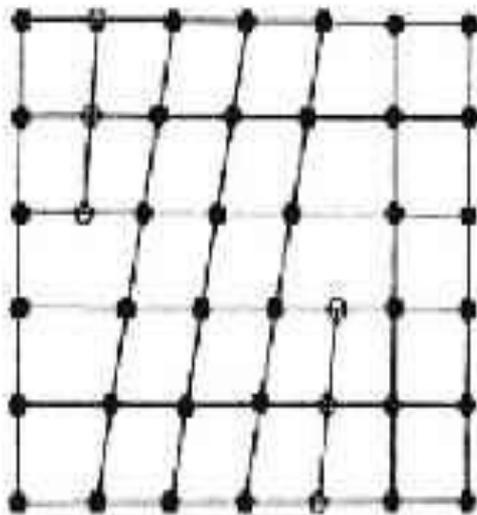


ANTES DEL DESLIZAMIENTO

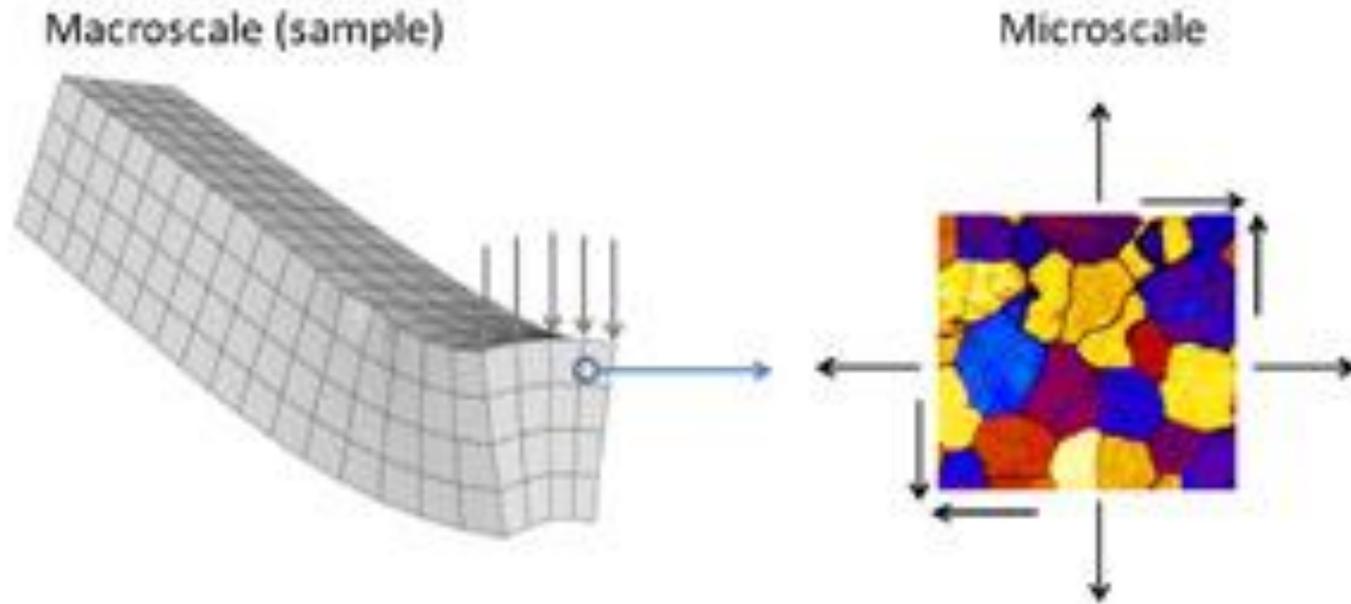


DESPUÉS DEL DESLIZAMIENTO

DISLOCACIONES DEL MISMO SIGNO



GRANOS CON DEFORMACIÓN GEMELA

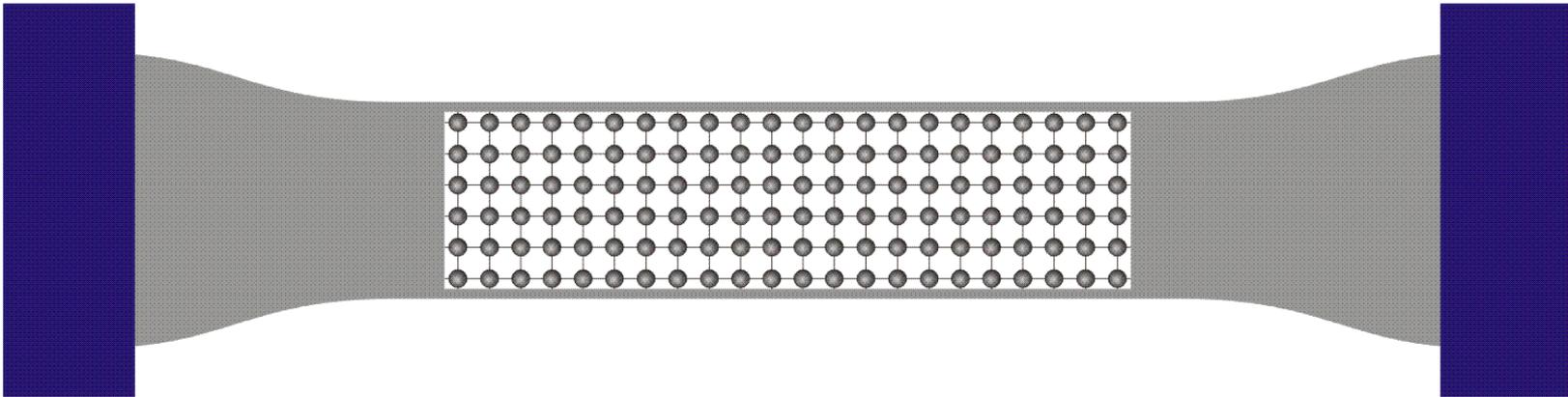


Modelo multiescala para la simulación de la deformación plástica de aleaciones de diseño policristalinas [1]: (a) escala macroscópica, donde la geometría global y las condiciones existentes en los límites del sólido se encuentran definidas; y, (b) escala microscópica, mediante la representación de la microestructura policristalina en cada punto del sólido.

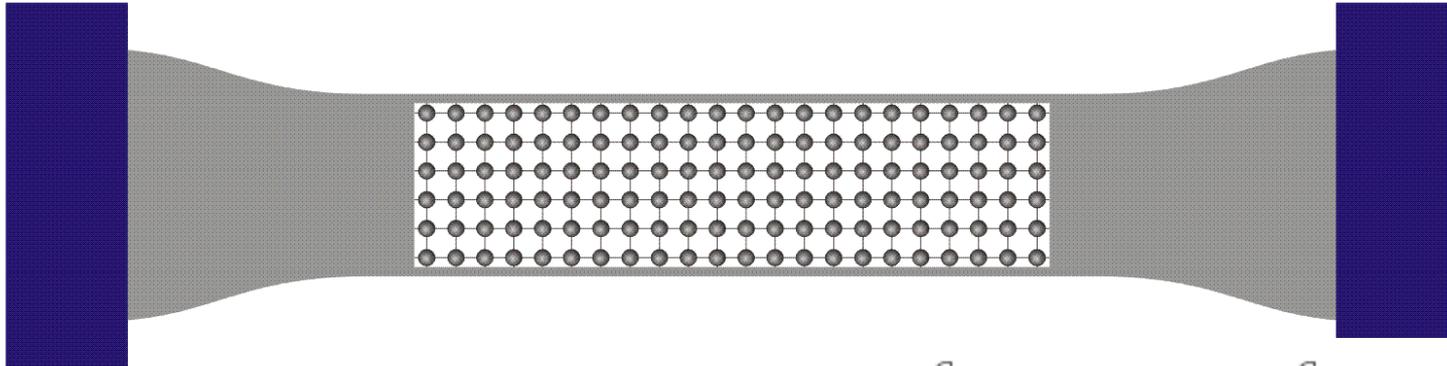
Concepto: Deformación Elástica (Reversible)

Es aquella en la que el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.

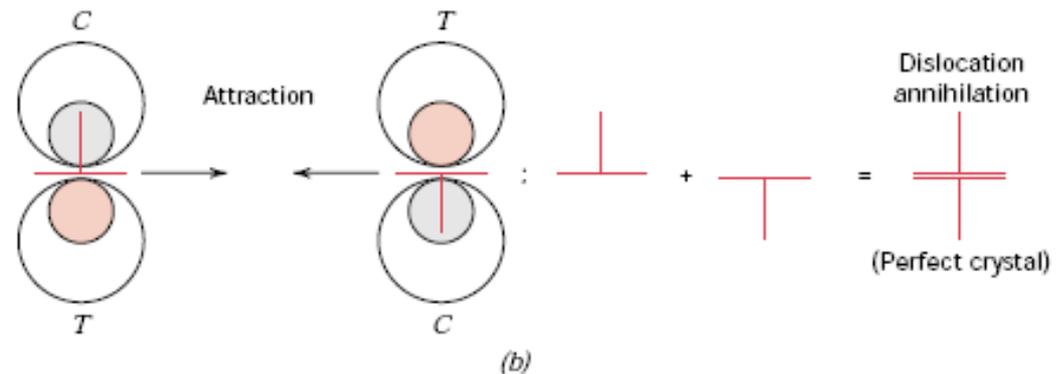
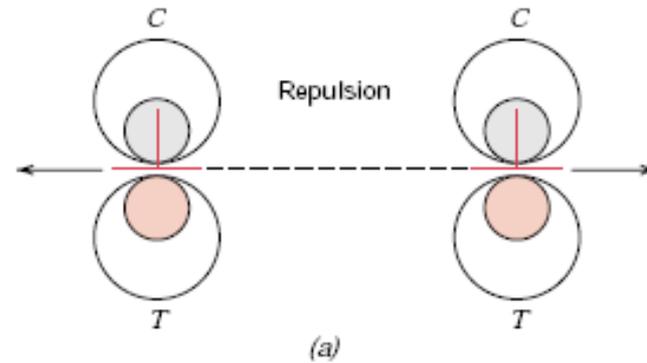
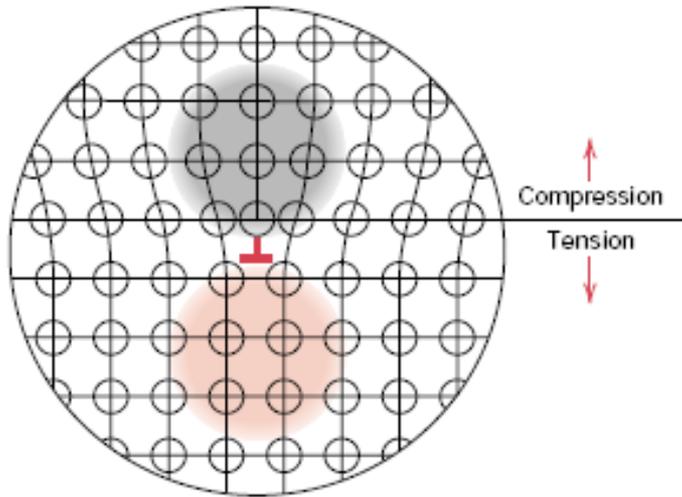
En este tipo de deformación el sólido varía su estado tensional y aumenta su energía interna en forma de energía potencial elástica.



Mecanismo de deformación: Deslizamiento de dislocaciones



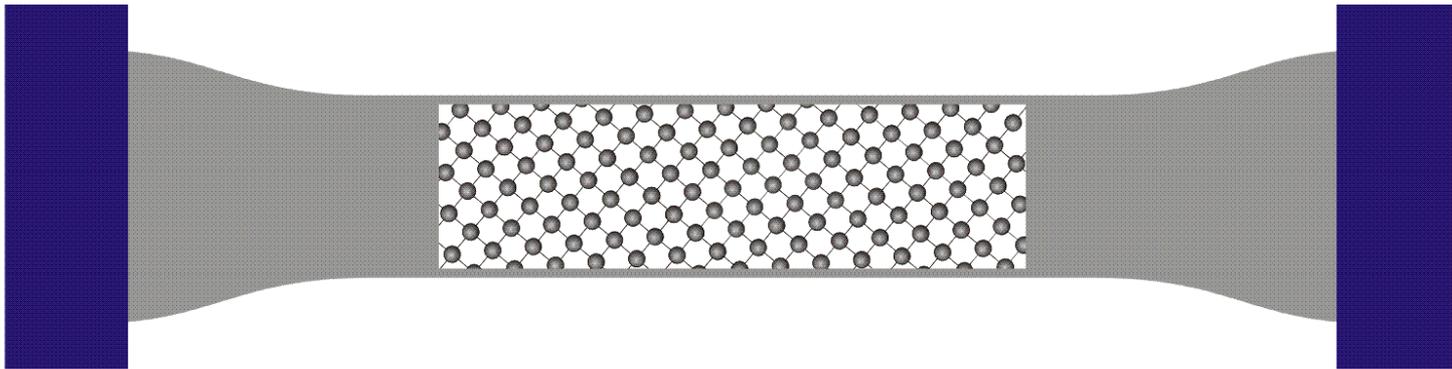
© D. M. Kochmann (2009)



Concepto: Deformación Plástica (Irreversible)

Es aquella en la que el cuerpo no recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.

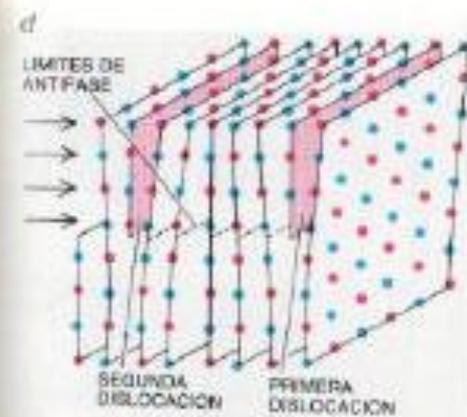
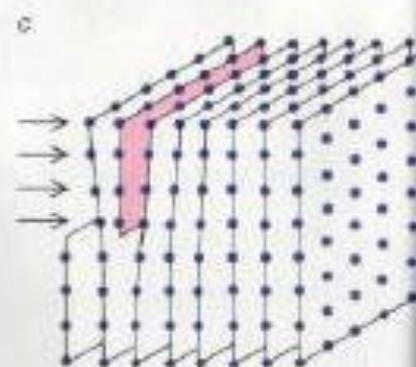
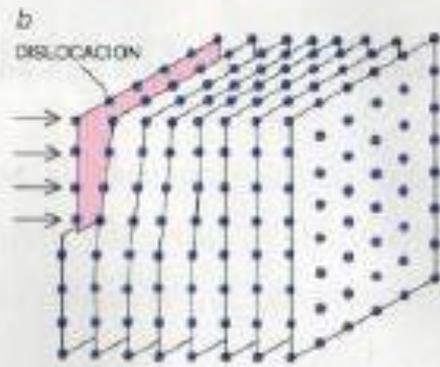
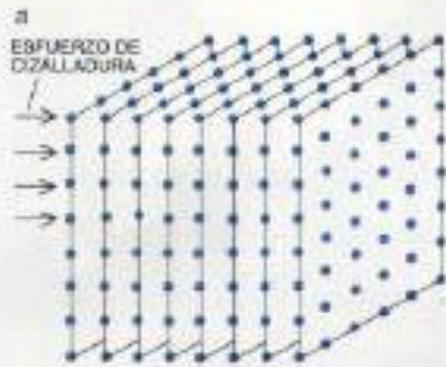
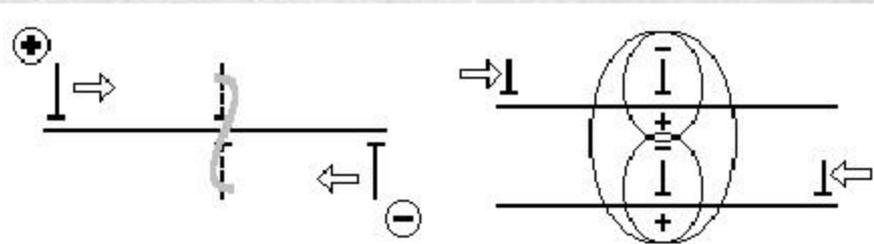
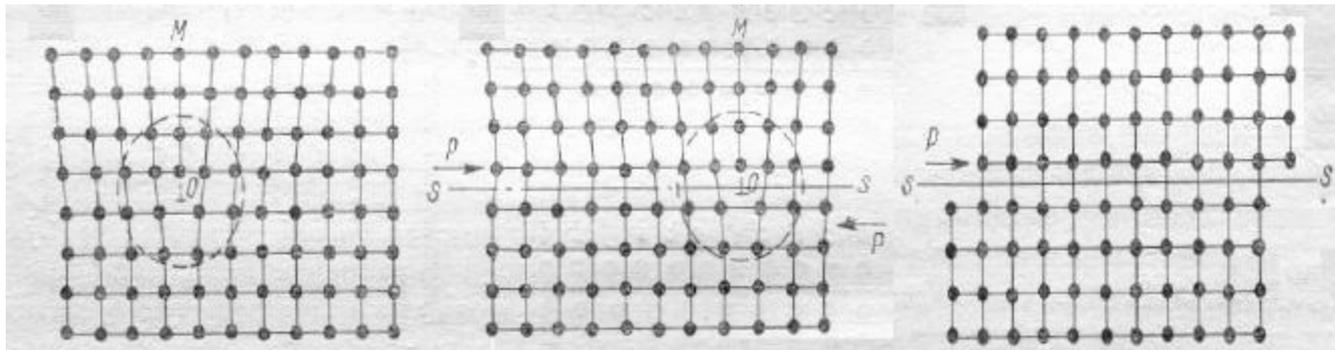
En los materiales metálicos, la deformación plástica ocurre mediante la formación y movimiento de dislocaciones. Un mecanismo de deformación secundario es el maclado (formación de maclas).

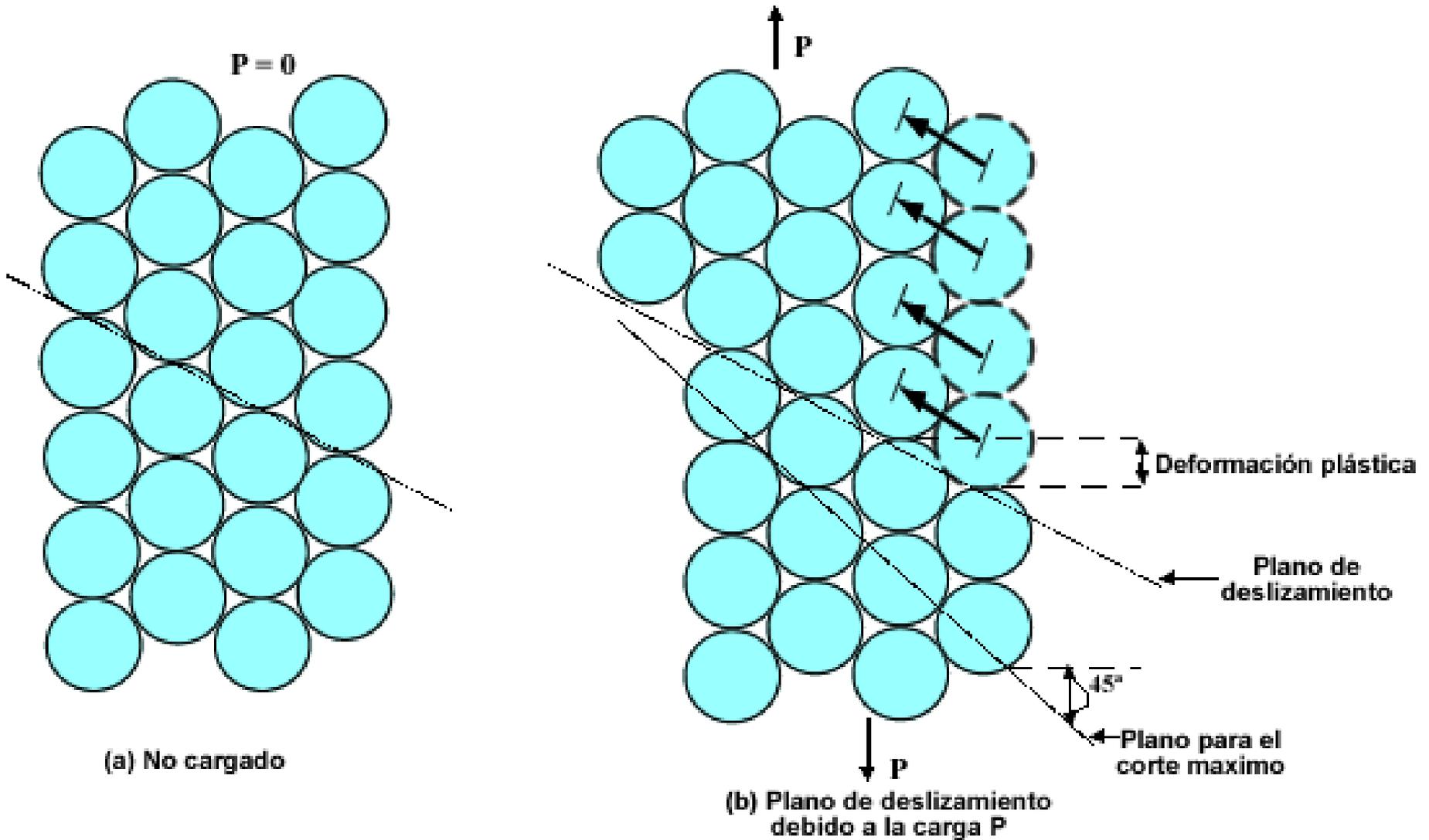


© D. M. Kochmann (2009)

Estos mecanismos de deformación plástica (maclas y dislocaciones) se activan cuando la tensión aplicada superan a la tensión de fluencia del material. Es decir, en un ensayo de tracción, a la tensión de fluencia finaliza la zona de deformación elástica y comienza la zona de deformación plástica (la tensión deja de ser proporcional a la deformación).

Deformación plástica





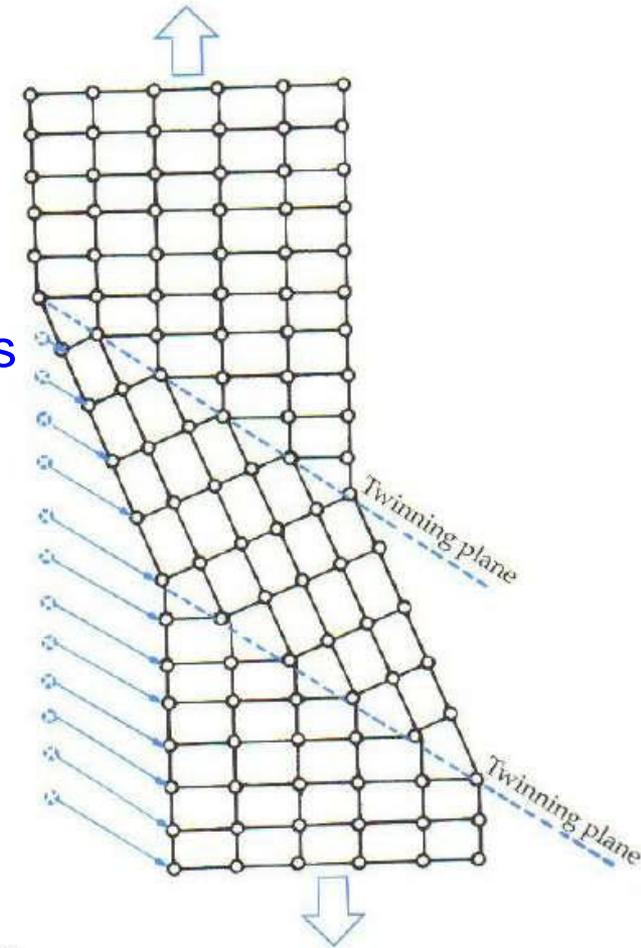
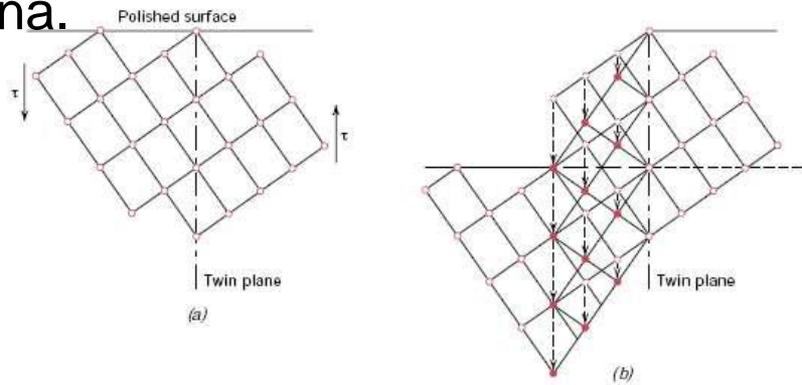
Deformación plástica y plano de deslizamiento

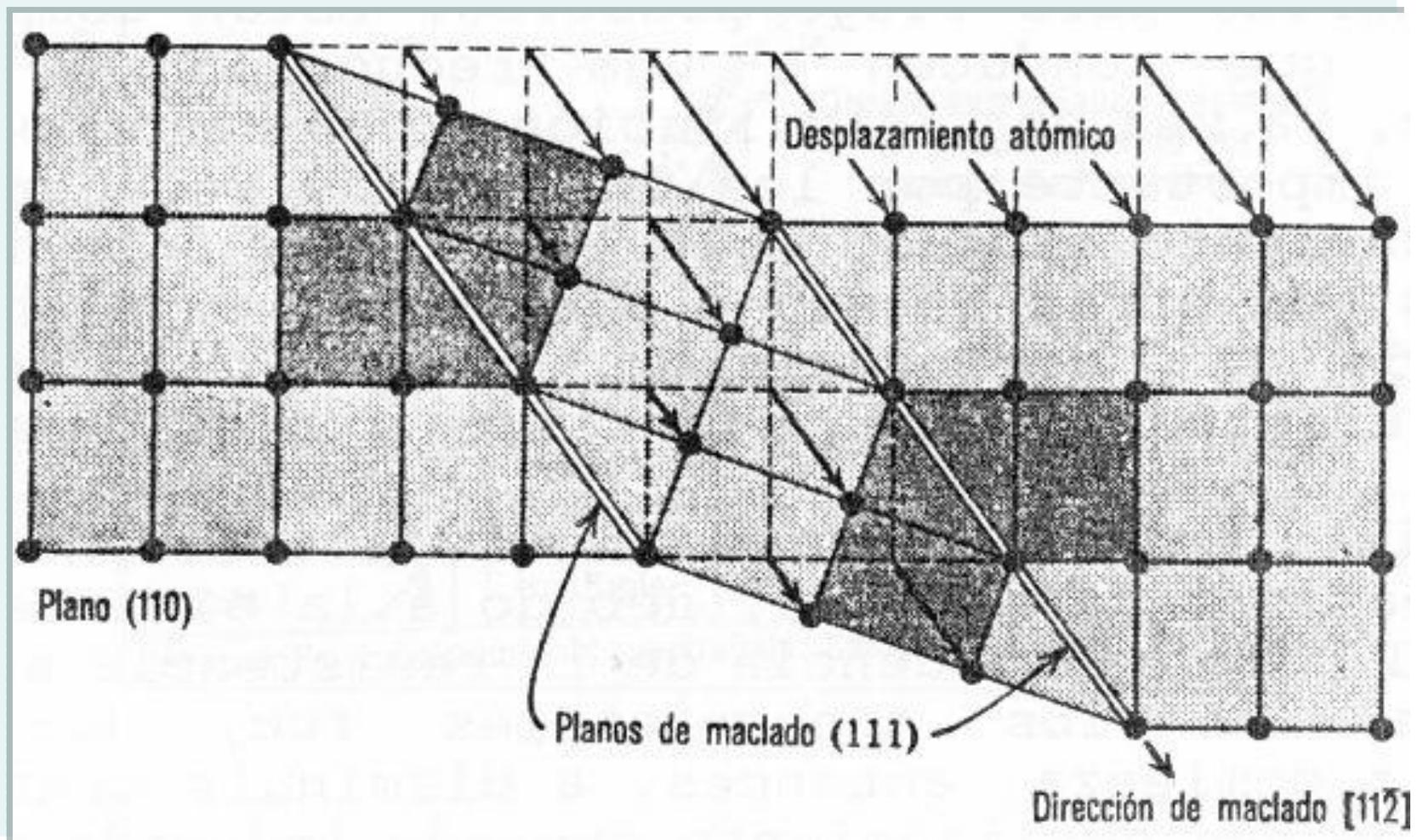
Mecanismo de Deformación por Maclado

En algunos materiales metálicos la deformación plástica puede ocurrir por maclado:

En el maclado, una Fuerza de corte produce desplazamientos atómicos de forma tal que en un lado de un plano (el plano de maclado), los átomos están situados como si fueran imágenes especulares de las posiciones de los átomos del otro lado.

El maclado ocurre en planos y direcciones cristalográficas bien definidas, dependiendo de la estructura cristalina.





**Diagrama esquemático del
proceso de maclado en la red
FCC.**

IMPERFECCIONES LINEALES: DISLOCACIONES

DISLOCACIÓN.- Imperfección lineal alrededor de la cual los átomos del cristal están desalineados

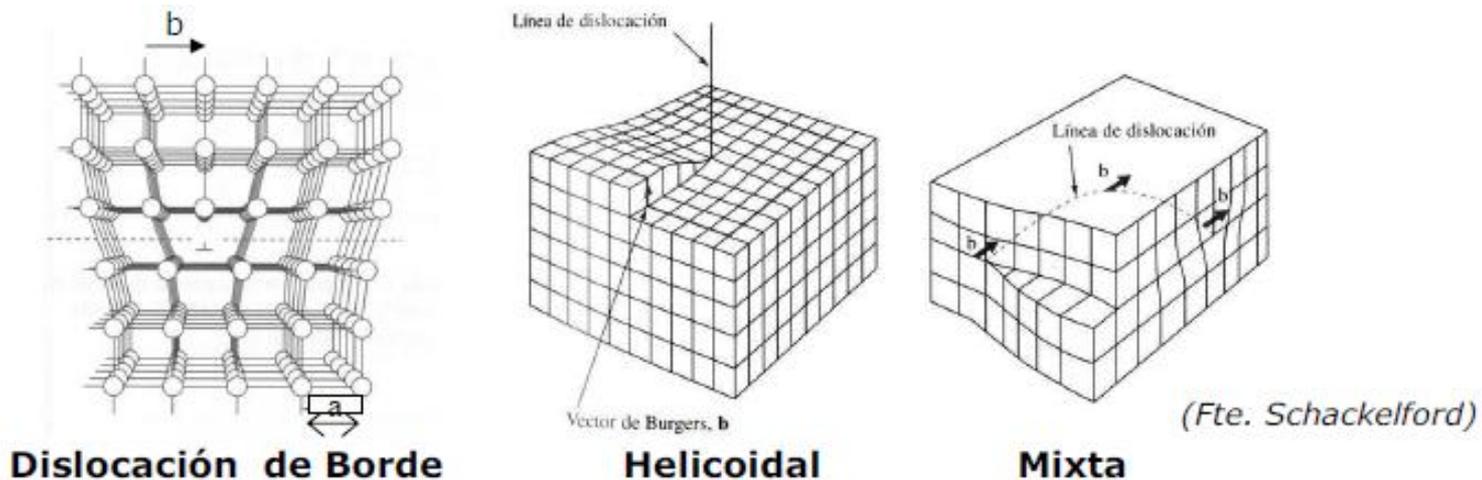
DE ARISTA (borde, cuña, línea)

Semiplano de átomos cuya arista (borde) termina dentro del cristal.

HELICOIDAL

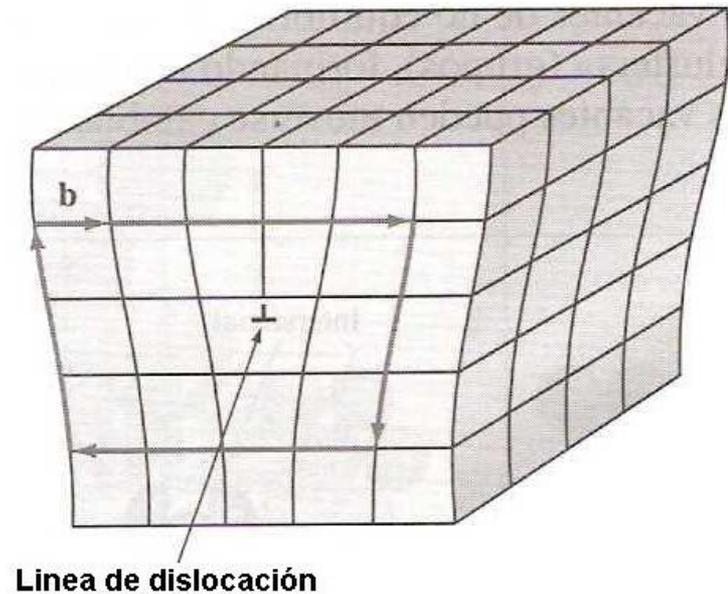
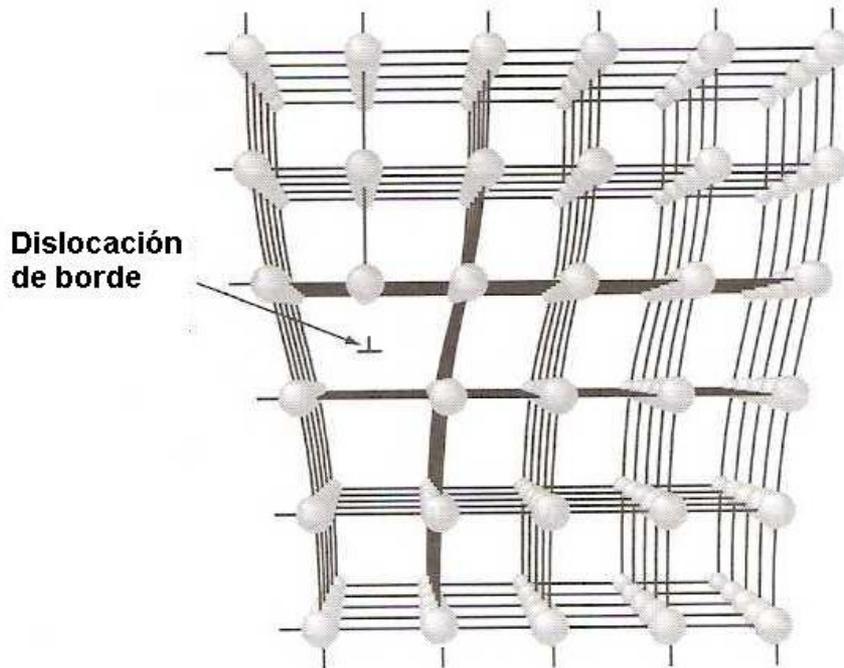
Apilación de planos en espiral a lo largo de la línea de dislocación.

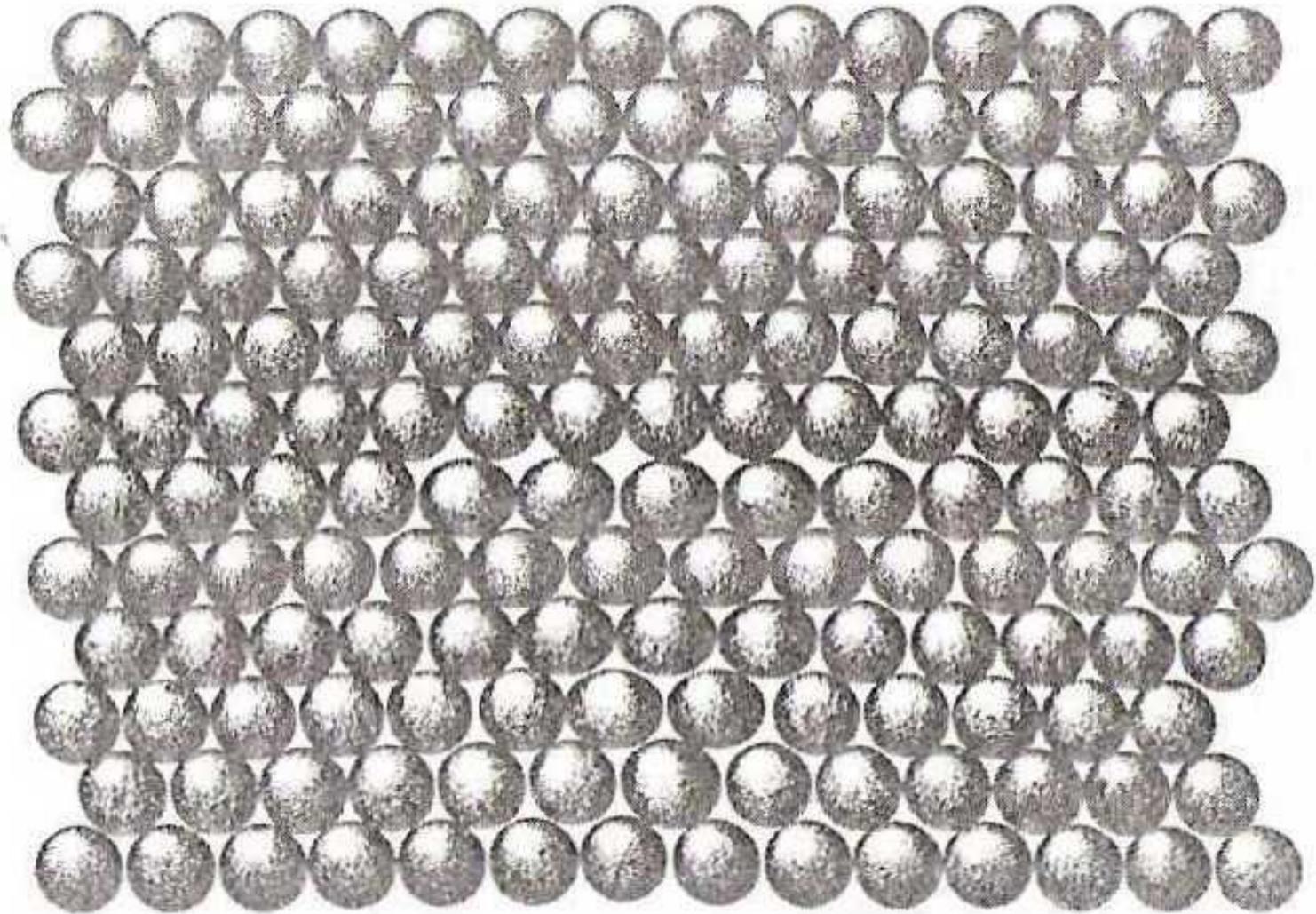
MIXTAS De carácter doble: arista y helicoidal



Dislocación de borde

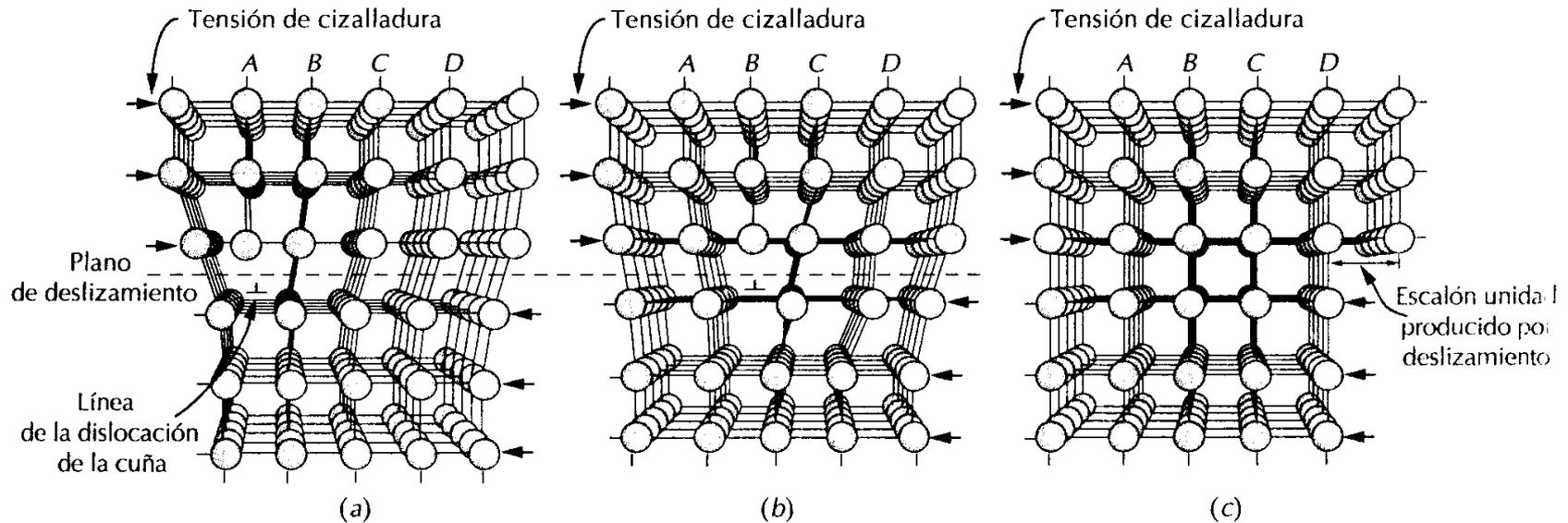
Una dislocación de borde se crea en un cristal por la intersección de un semiplano extra de átomos





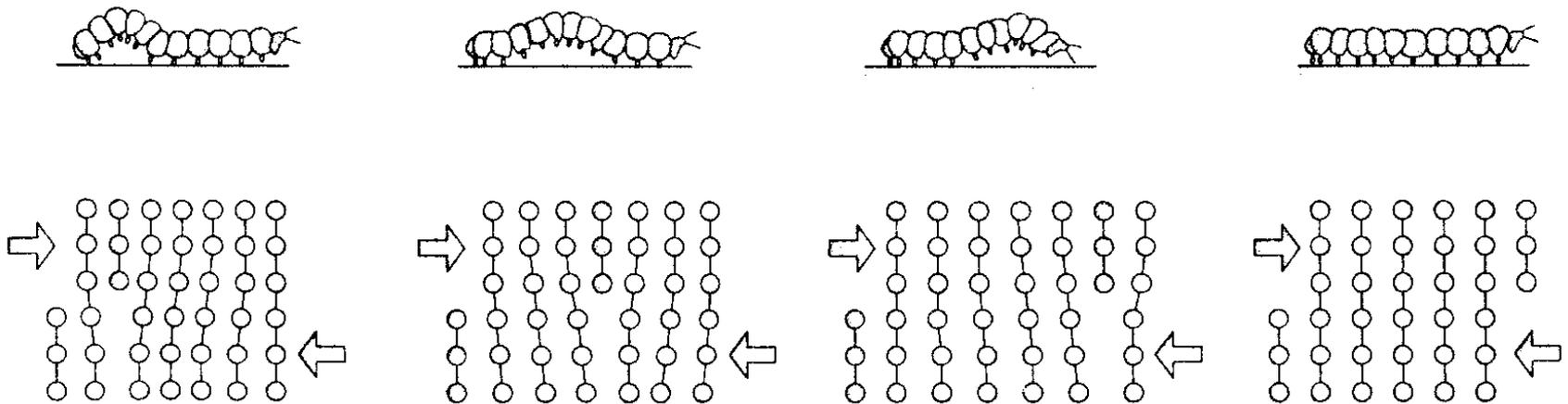
**Dislocación de borde en dos
dimensiones de un plano compacto**

Desplazamiento de una dislocación



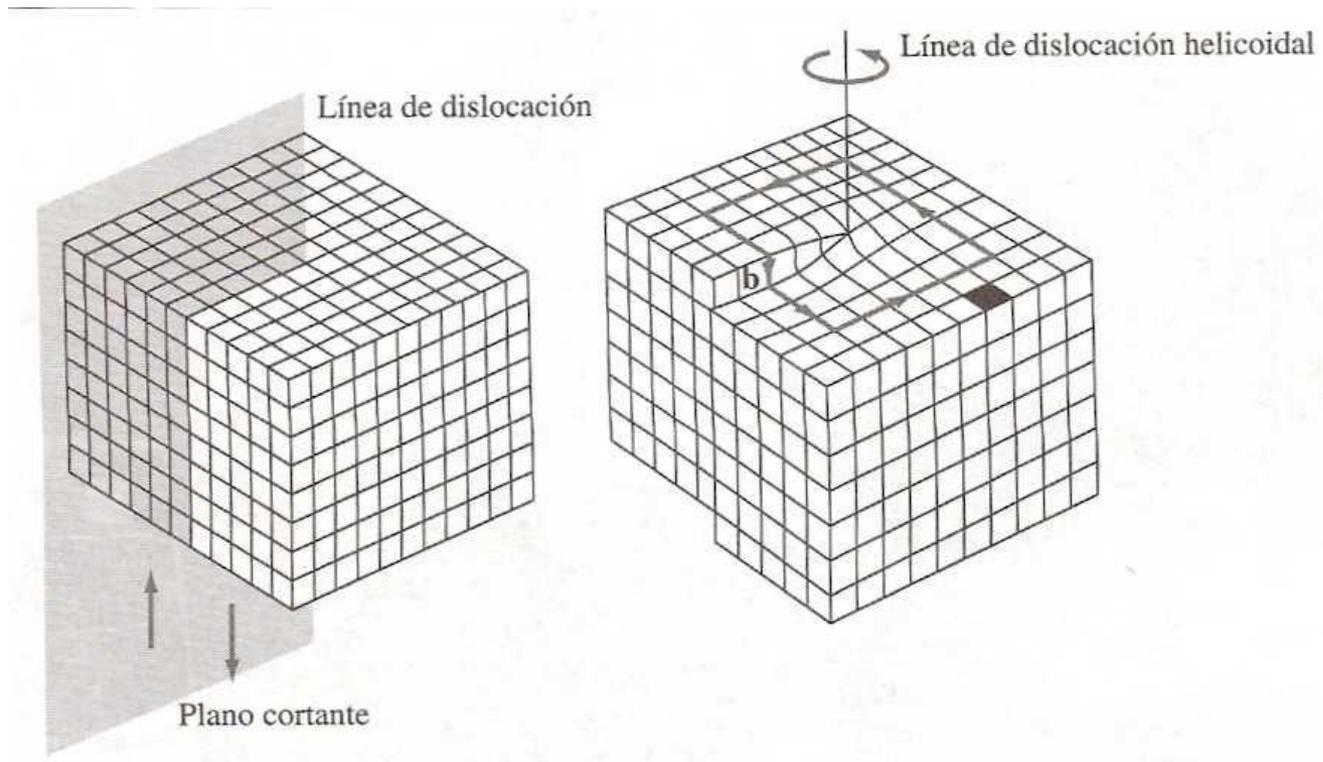
Cambios en las posiciones atómicas que acompañan al movimiento de una dislocación de borde (cuña) a medida que ésta se mueve en respuesta a una tensión de cizalle aplicada.

Dislocaciones y Deformación Mecánica.- *Las dislocaciones facilitan la deformación plástica (permanente) de los sólidos cristalinos*



Representación de la analogía entre el movimiento de una oruga y el de una dislocación.

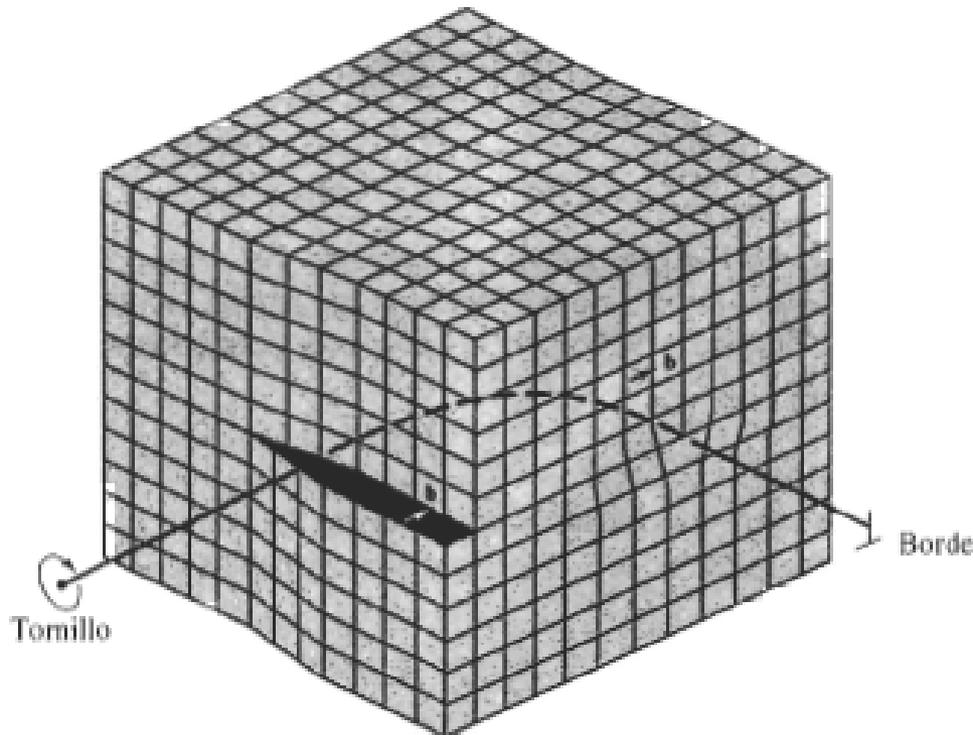
Si se aplican esfuerzos de corte, los átomos rompen sus enlaces en el defecto y la dislocación se mueve (deslizamiento), en la dirección de deslizamiento, en el plano de deslizamiento.

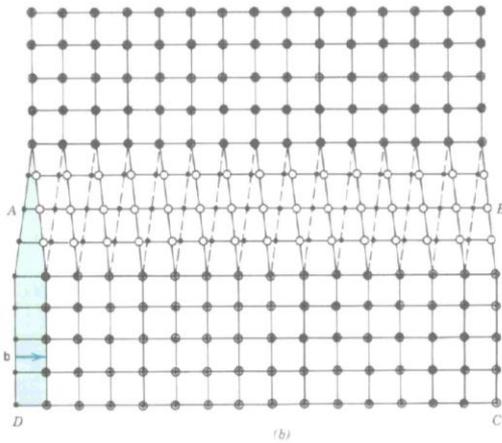
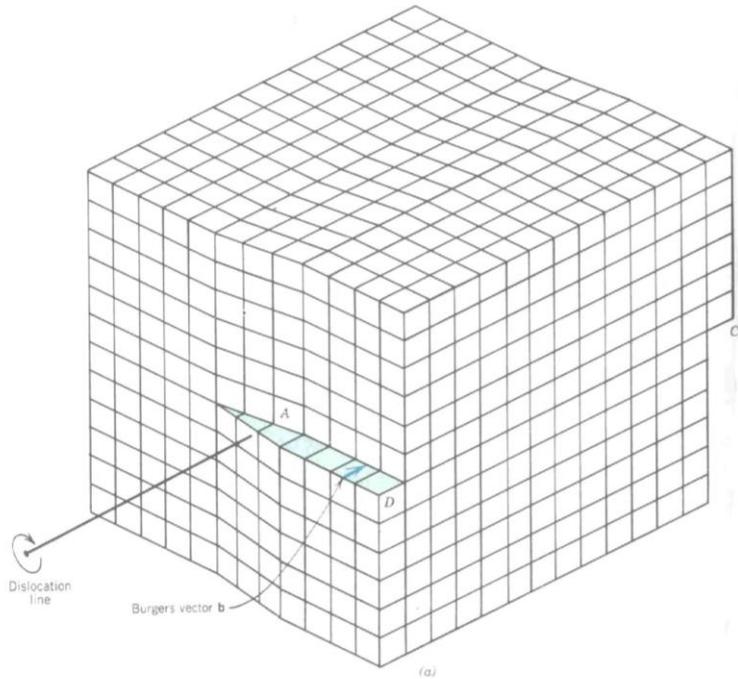


Formación de una dislocación helicoidal

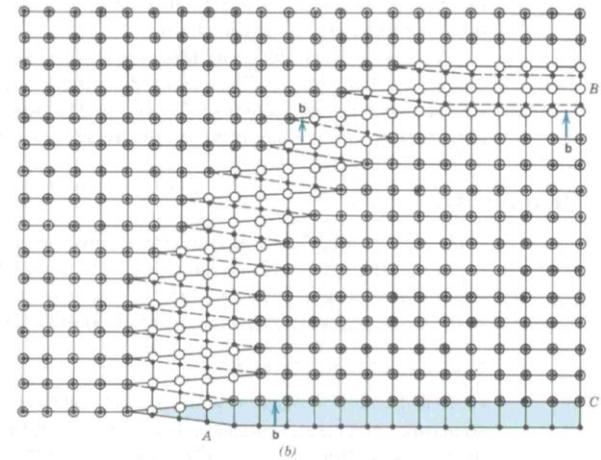
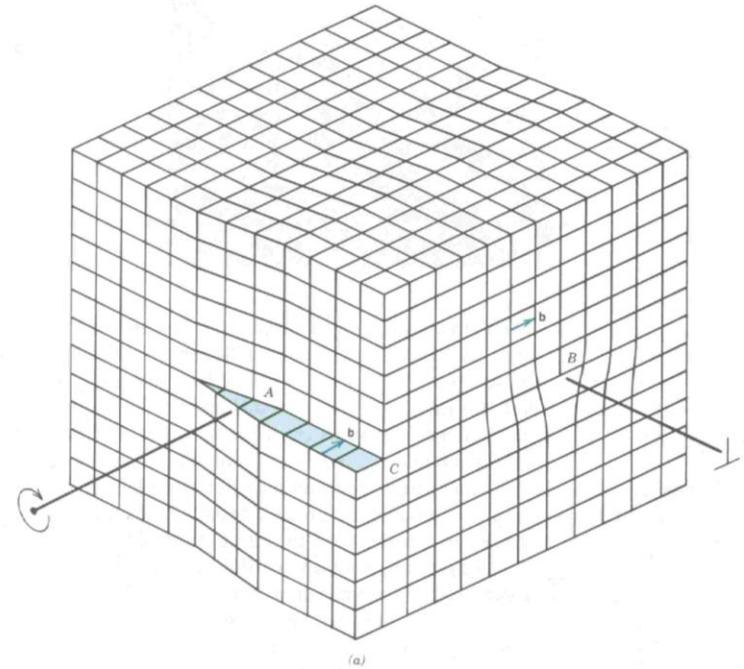
Dislocación mixta

La línea de dislocación puede presentar partes de carácter de borde y otras de carácter de tornillo. El desorden atómico varia a lo largo de la curva AB

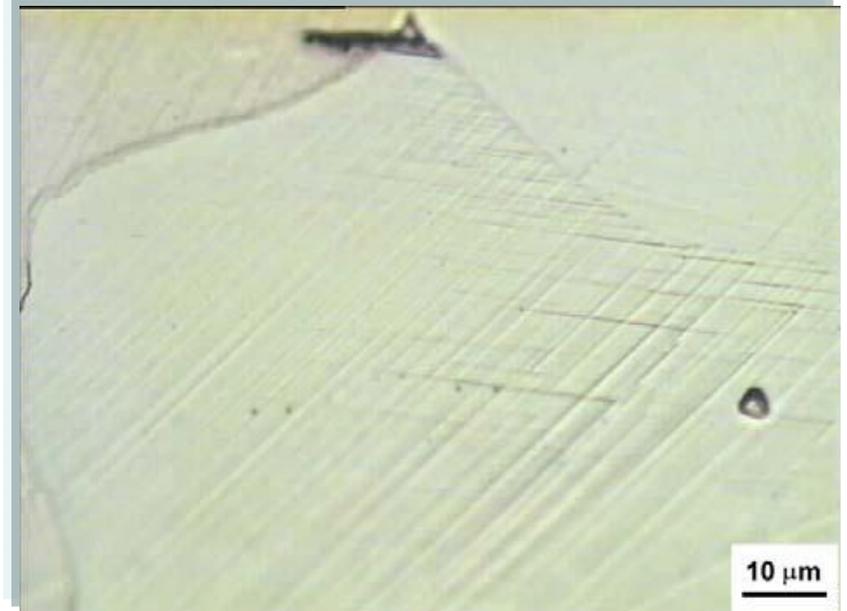
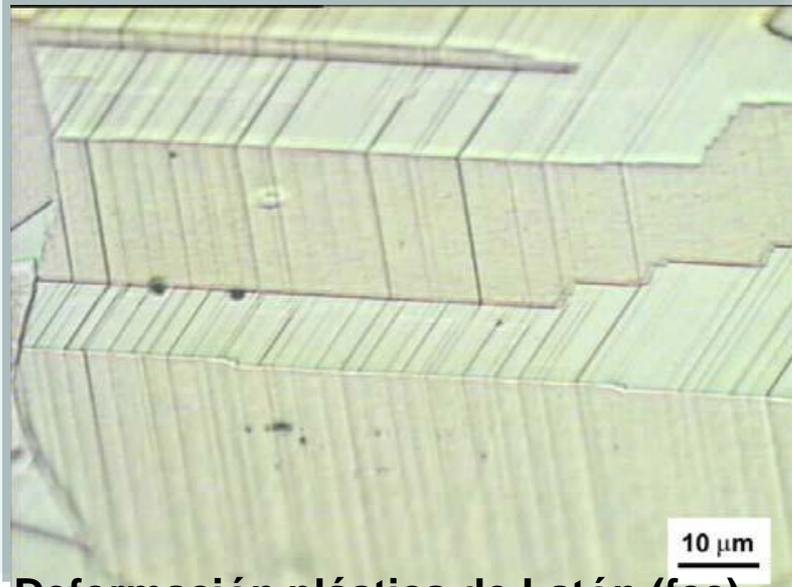
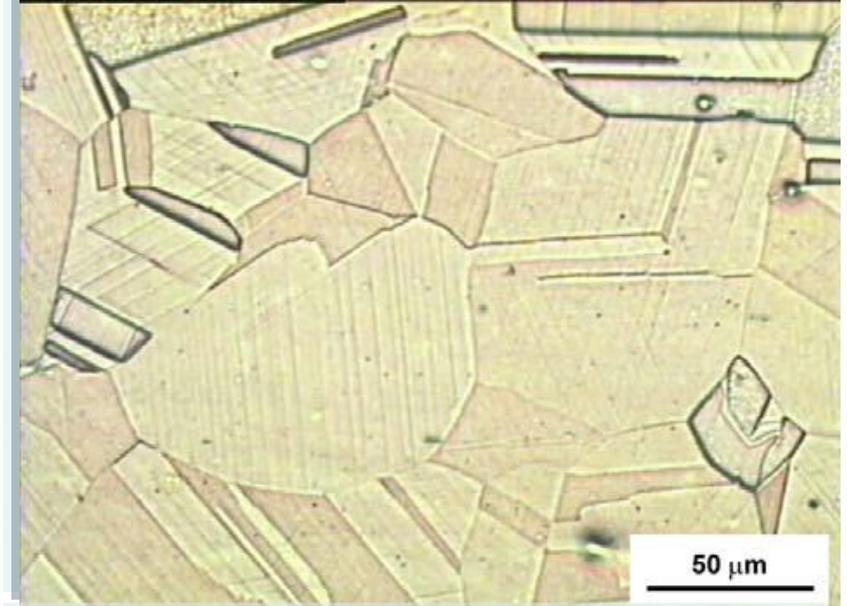
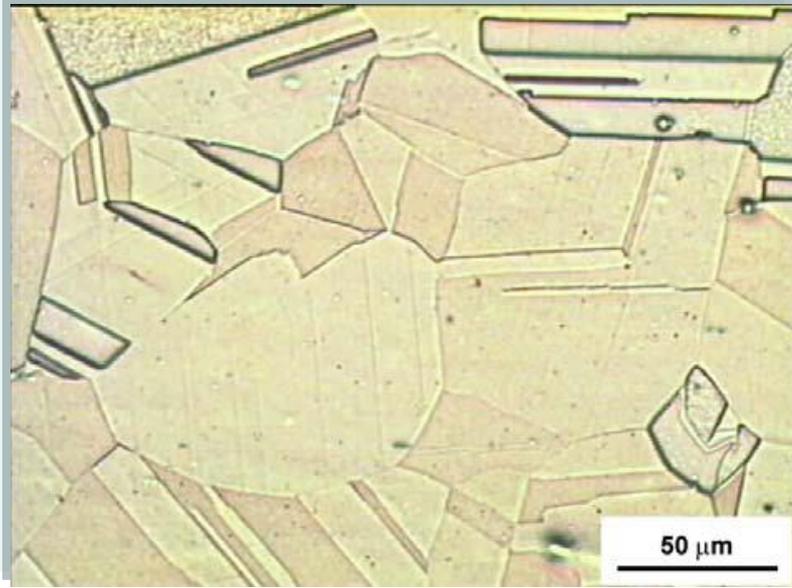




Dislocación de tornillo



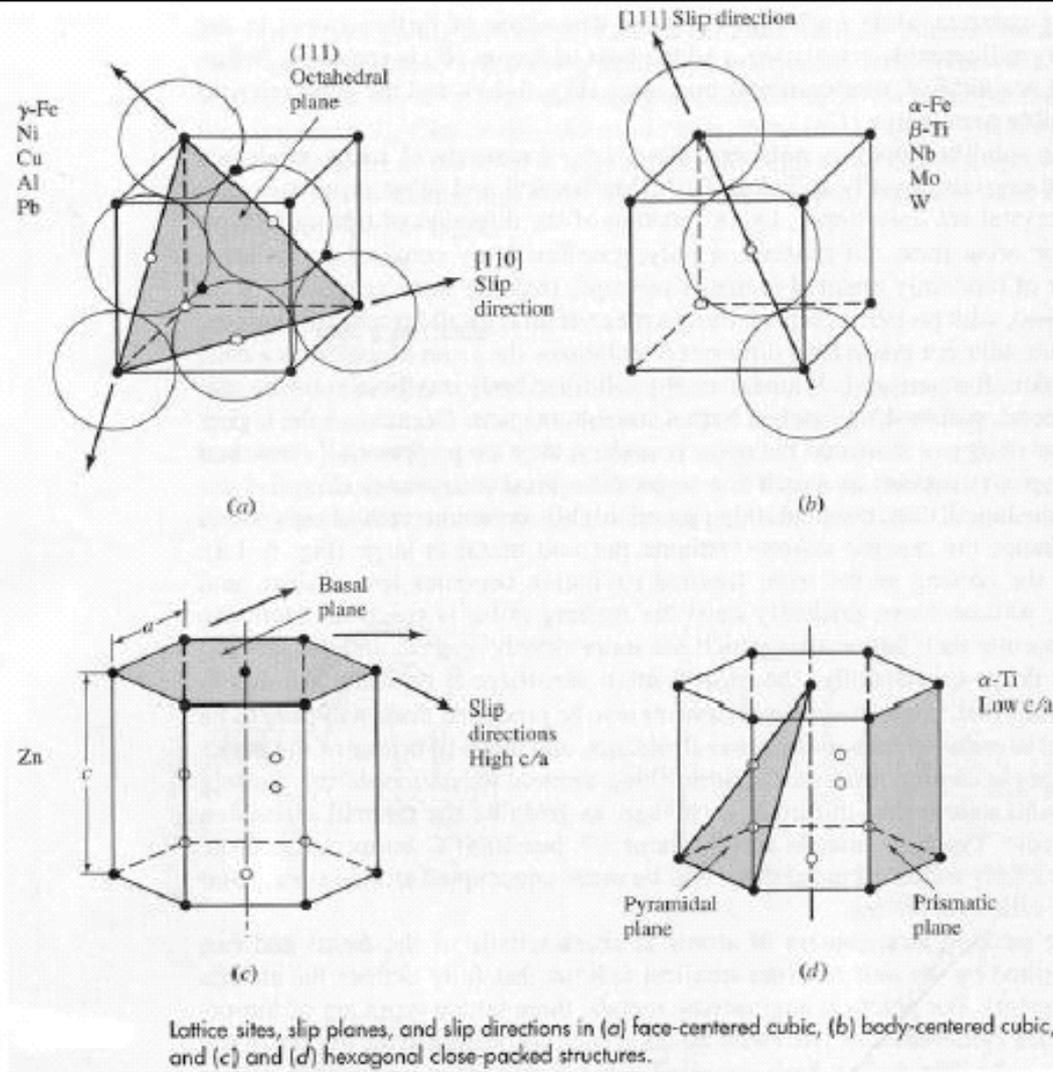
Dislocación mixta



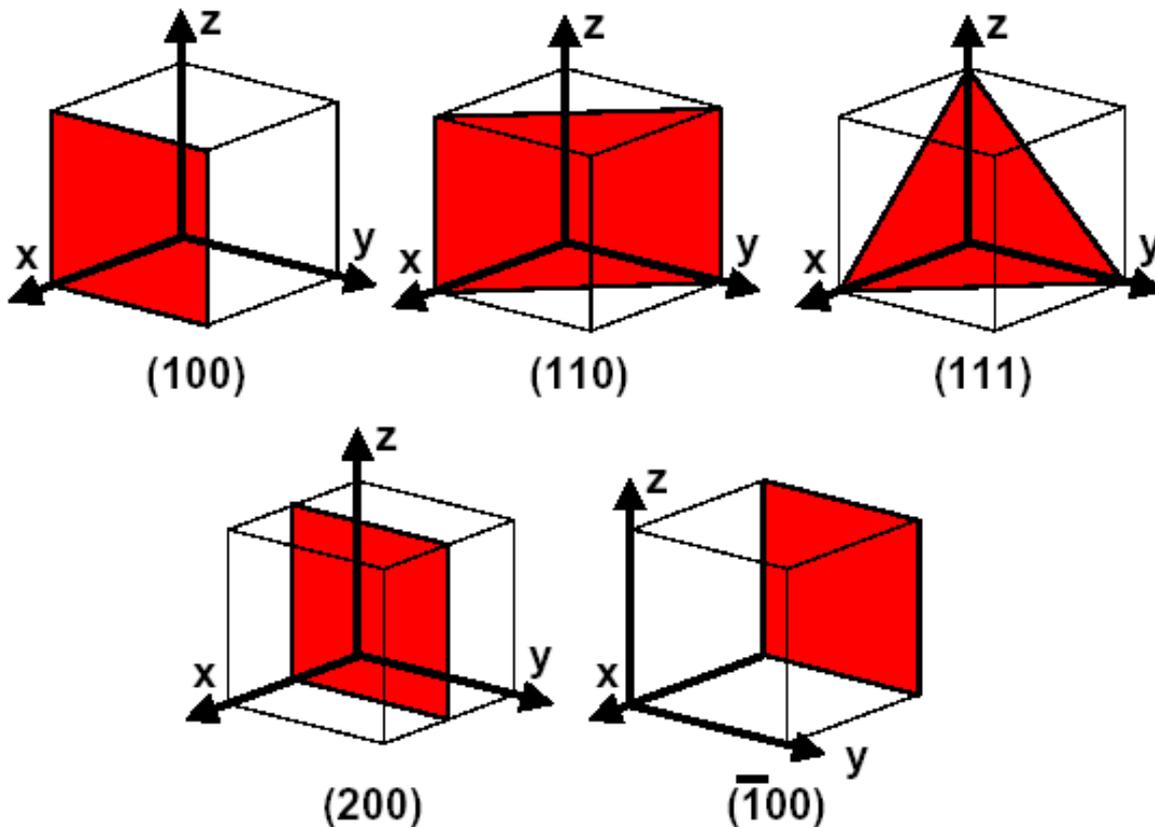
Deformación plástica de Latón (fcc)

- a) Inicio de la deformación. Líneas de deslizamiento en algunos granos
- b) Aparición de otros sistemas de deslizamiento al aumentar la deformación
- c) Quiebre de las líneas de deslizamiento al atravesar maclas de recocido.
- d) Detalle de deslizamiento cruzado

Planos de deslizamiento de diferentes cristales



Representaciones de diversos planos cristalográficos



Miller indices of a (200) plane

intercepts	0,5	∞	∞
reciprocals	2	0	0
reductions	not necessary		
enclosure	(200)		

Miller indices of a $\bar{1}00$ plane

intercepts	-1	∞	∞
reciprocals	-1	0	0
reductions	not necessary		
enclosure	$\bar{1}00$		

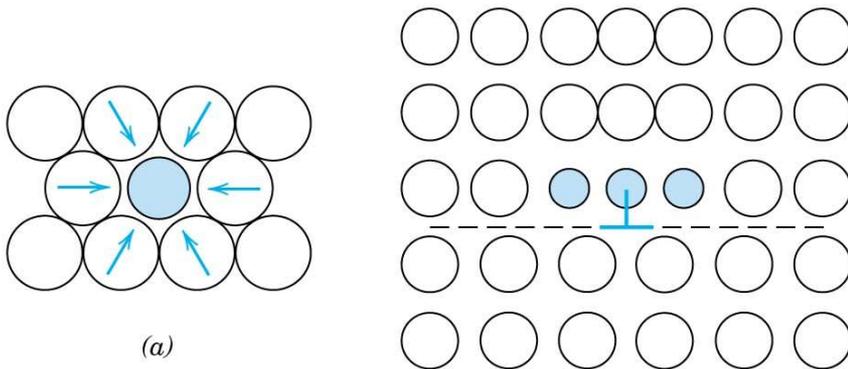
A "family" of (hkl) : $\{hkl\}$
 e.g., in cubic crystals, $\{100\}$:
 (100) , (010) , (001)
 $\bar{1}00$, $0\bar{1}0$, $00\bar{1}$

• crystallographic plane - Miller indices (hkl)

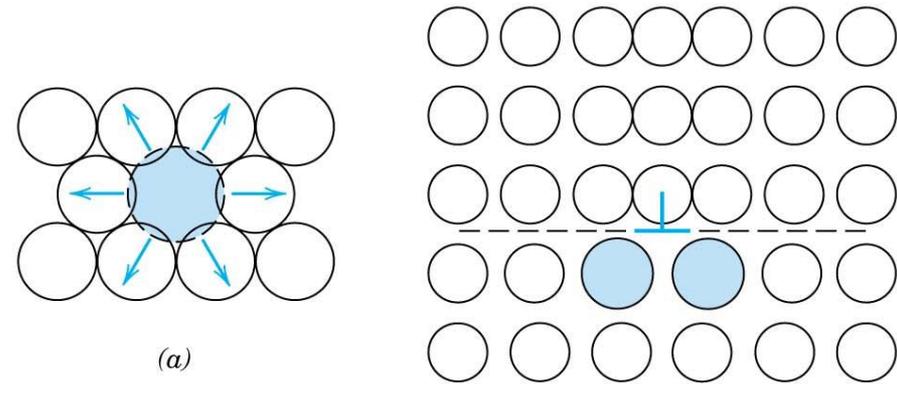
Mecanismos de Endurecimiento: Solución Sólida

Los átomos de impurezas o solutos de una ss se ven atraídos por los campos de tensiones de las dislocaciones, de forma tal de cancelar en forma parcial la deformación de la red alrededor de la dislocación.

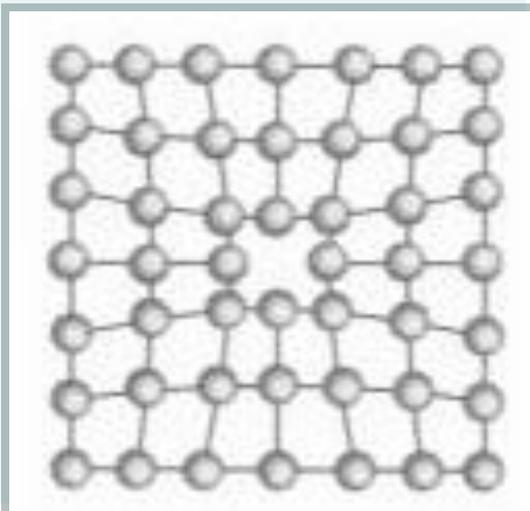
→ Si la dislocación quiere moverse, debe tener una energía adicional para vencer el “anclaje” de las impurezas / solutos de ss.



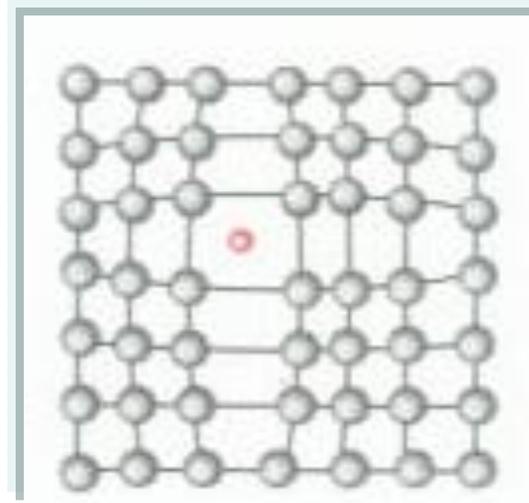
Los átomos de menor tamaño^(b) se quedan arriba de la dislocación.



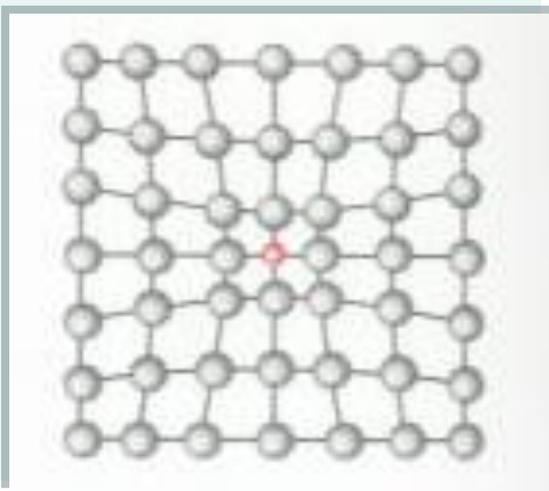
Los átomos de mayor tamaño^(b) se quedan abajo de la dislocación.



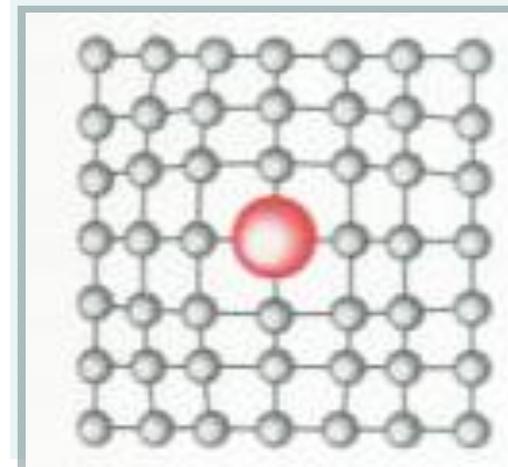
Vacante



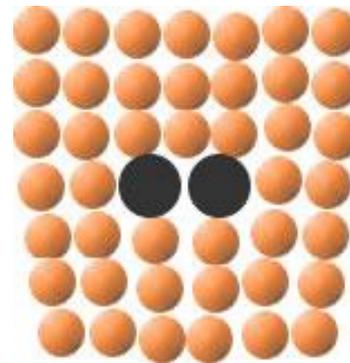
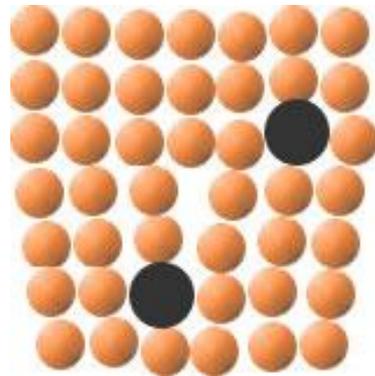
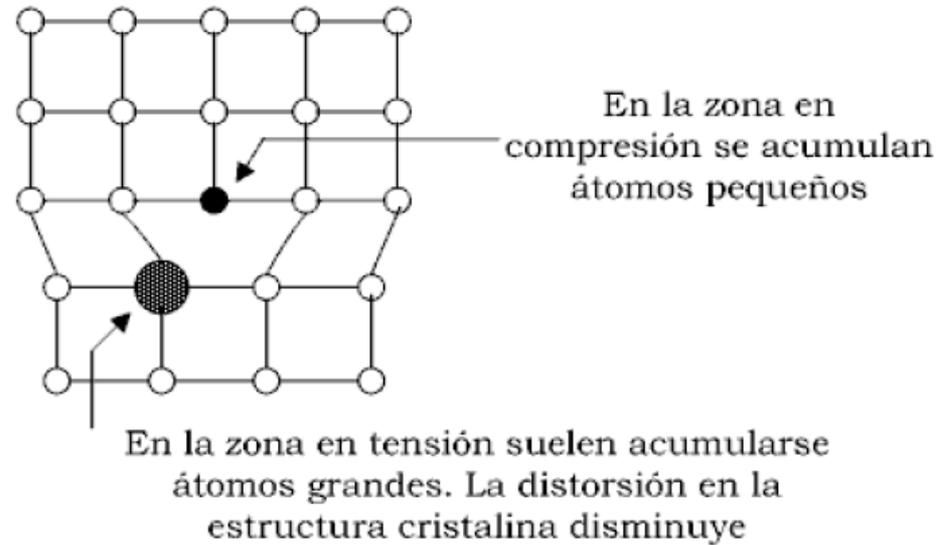
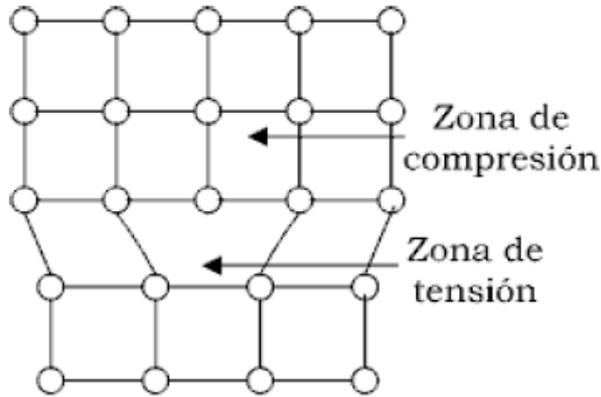
Defecto Intersticial

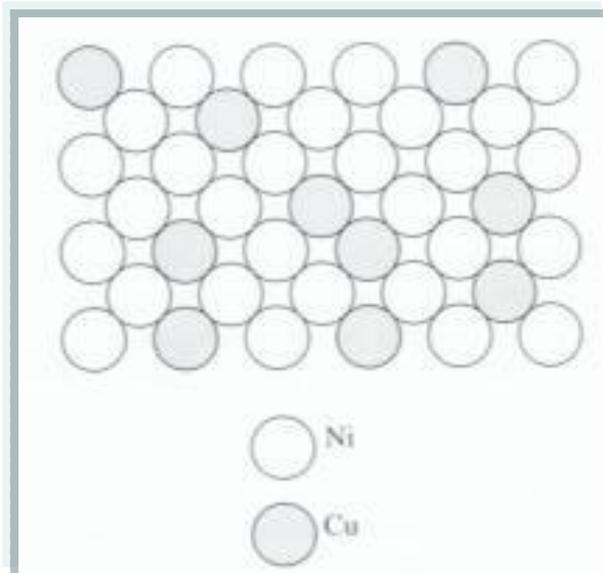


Impurezas o reemplazamientos

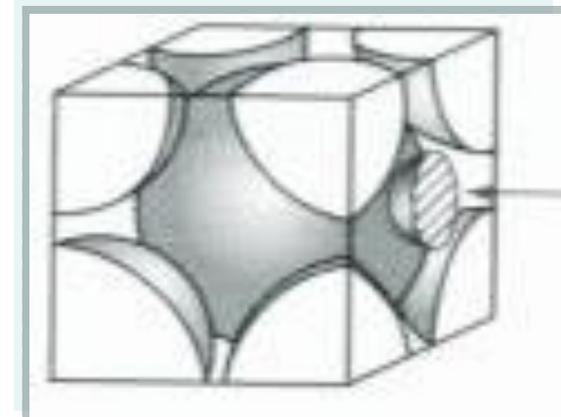


Si los átomos solutos se reúnen preferentemente alrededor de las dislocaciones, la fuerza necesaria para mover una dislocación puede aumentar considerablemente.

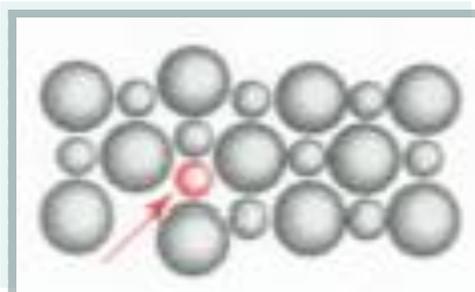




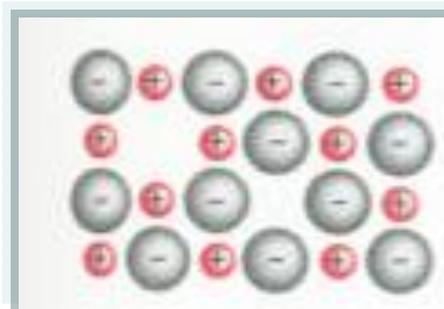
Solución sólida por sustitución de Cobre y Níquel



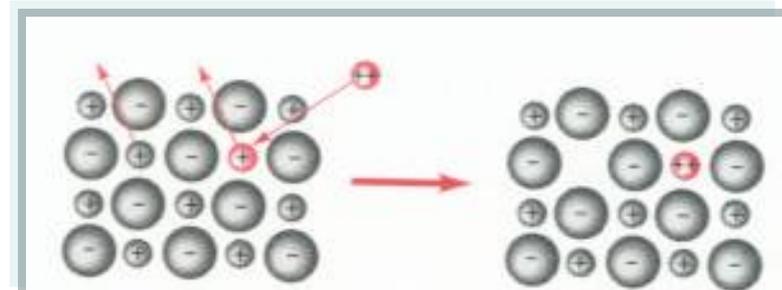
Impurezas intersticiales de Carbón en hierro



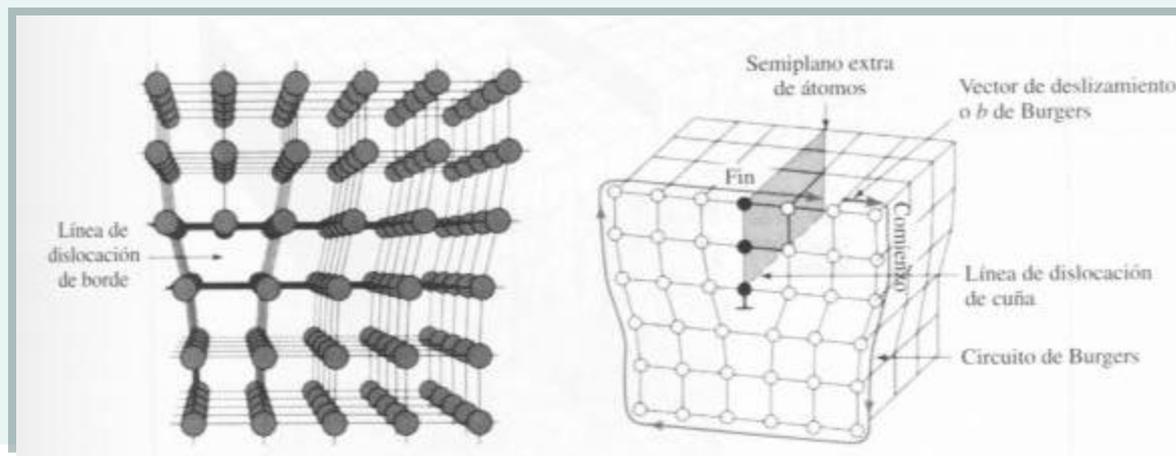
Defecto Frenkel



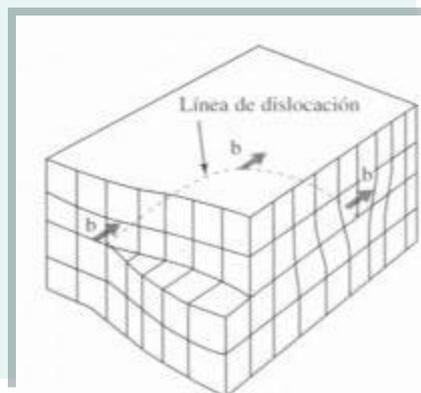
Defecto Schottky



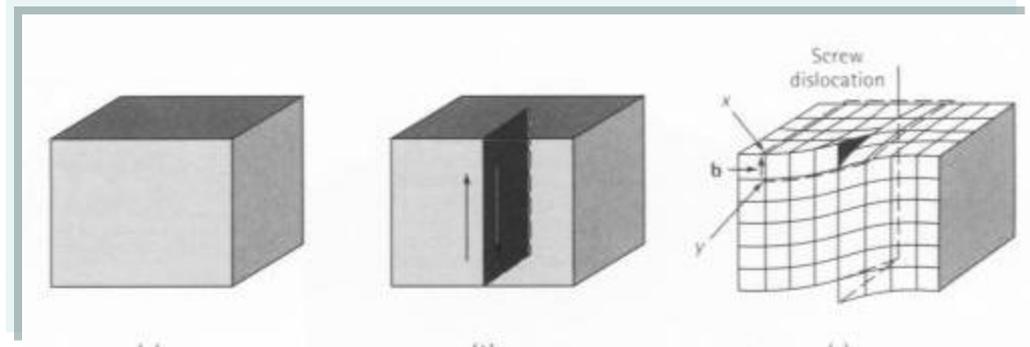
Defecto por reemplazamiento por iones de diferente carga



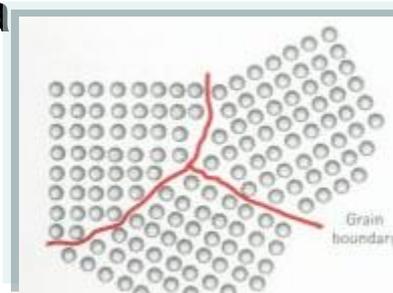
Dislocación de cuña



Dislocación mixta



Dislocación helicoidal



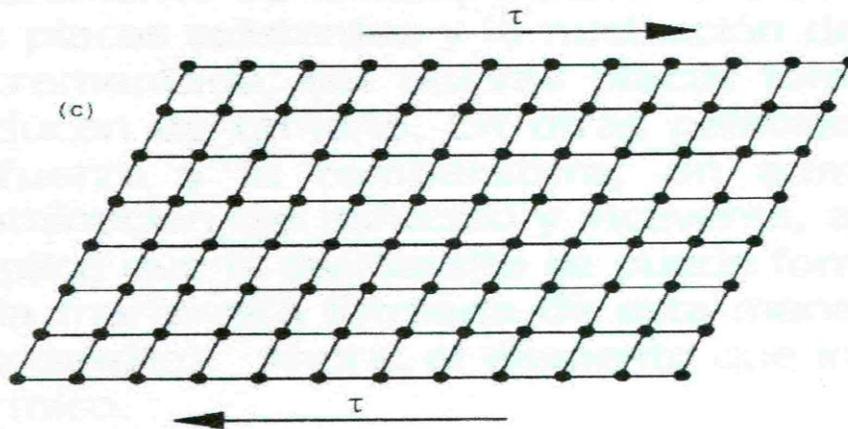
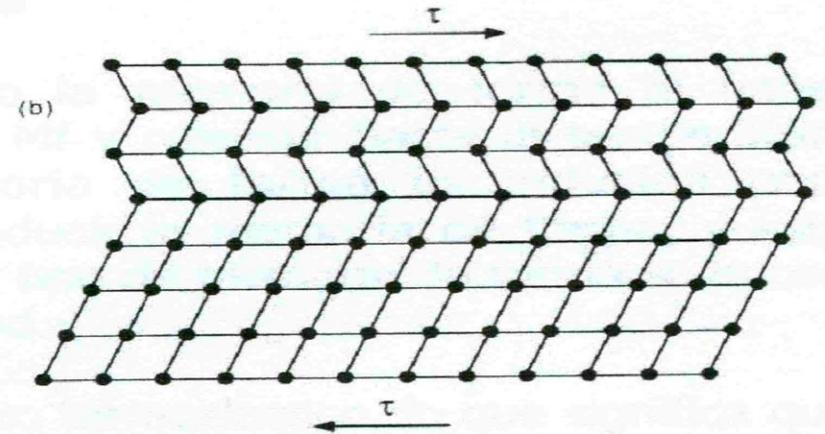
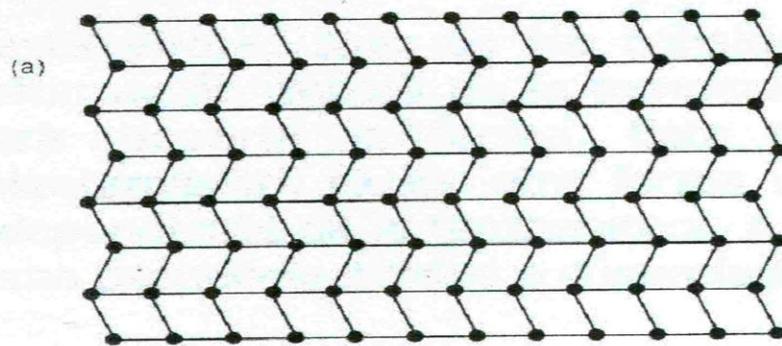
Bordes de grano

Aleaciones con memoria

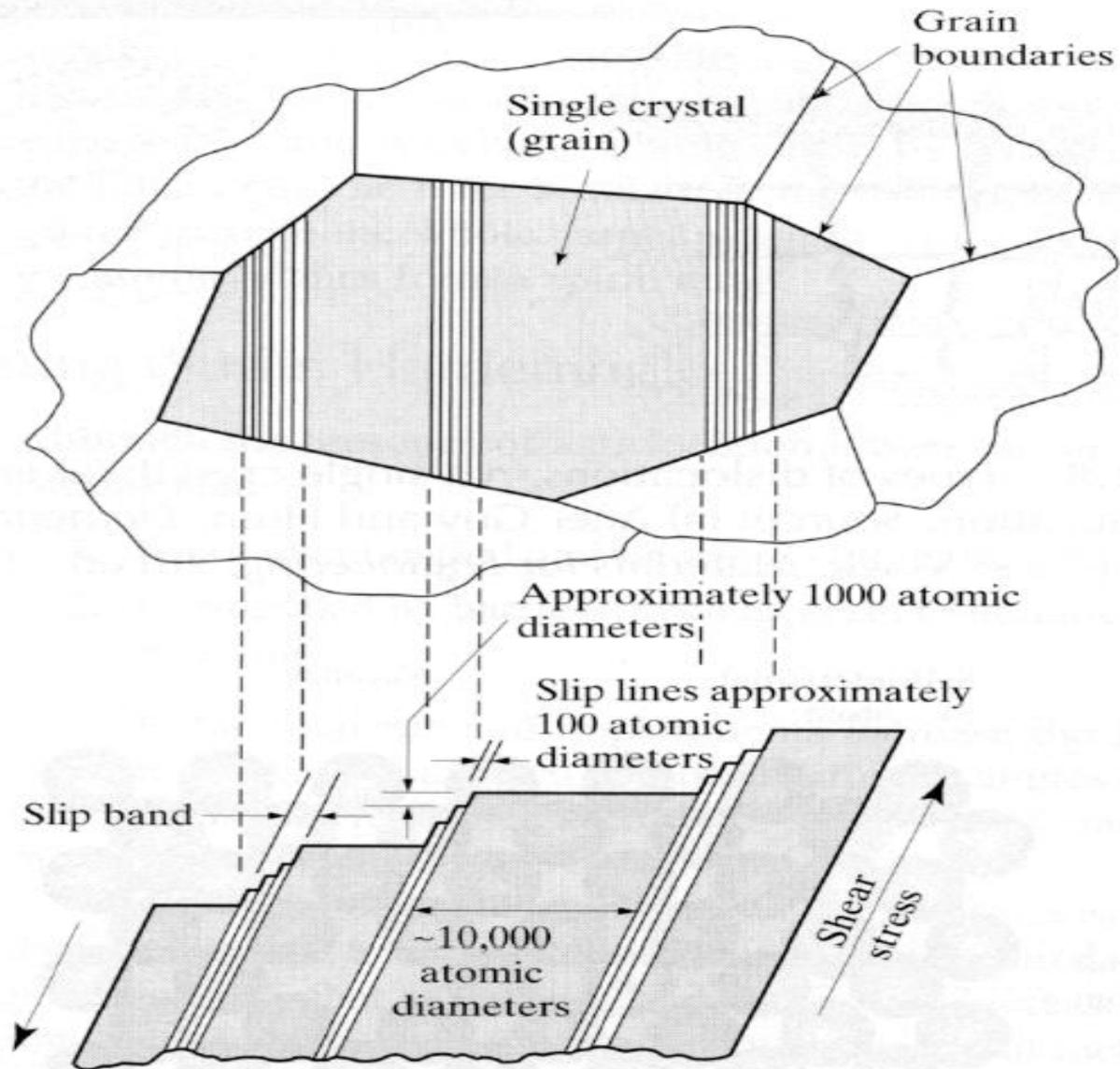
La mayoría de los metales inician su deformación plástica a partir de 0.2% de elongación a la tensión, las aleaciones con memoria pueden ser deformadas hasta un 5% antes de la deformación plástica.

- **NiTi**
- **CuZnAl**
- **CuAlNi**

Aleaciones con memoria

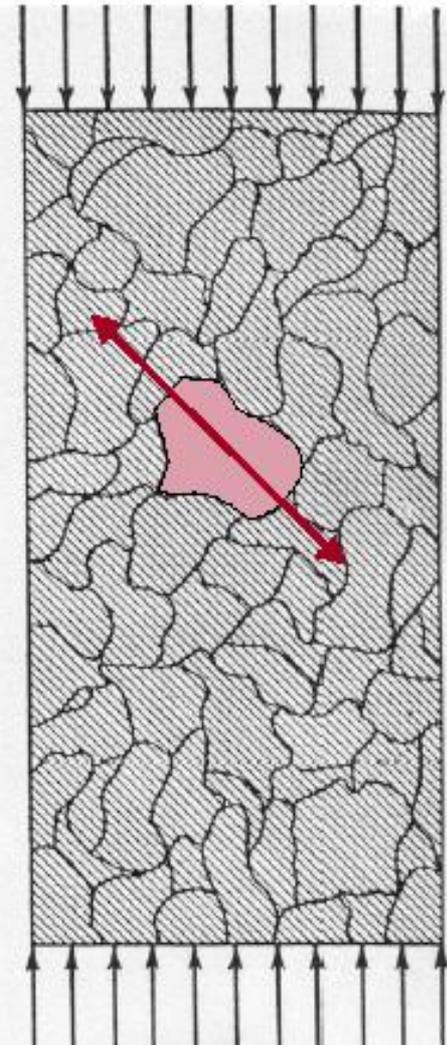
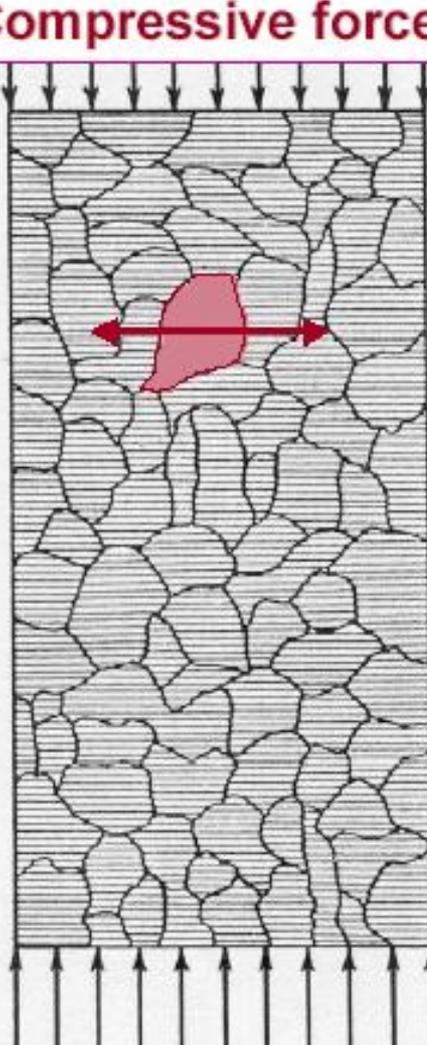
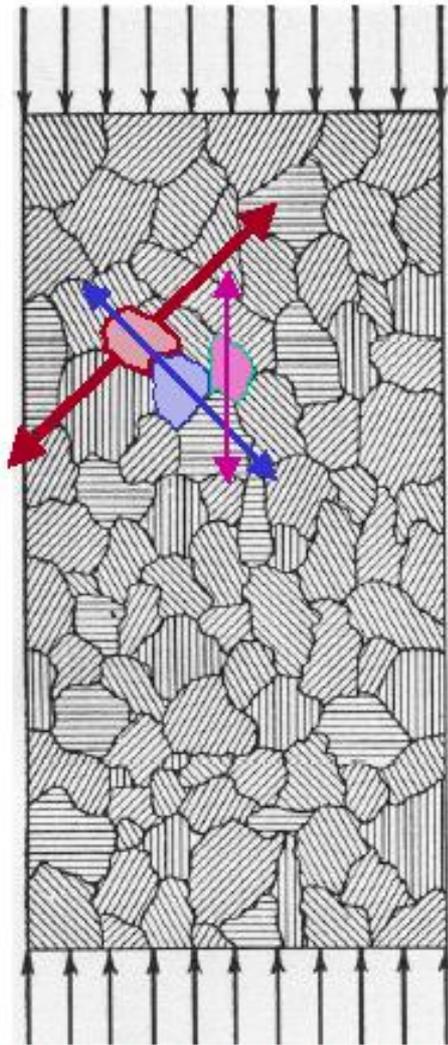


Deslizamiento de planos



Consider a part placed in compression and the orientation of slip planes for the highest strength:

Compressive forces



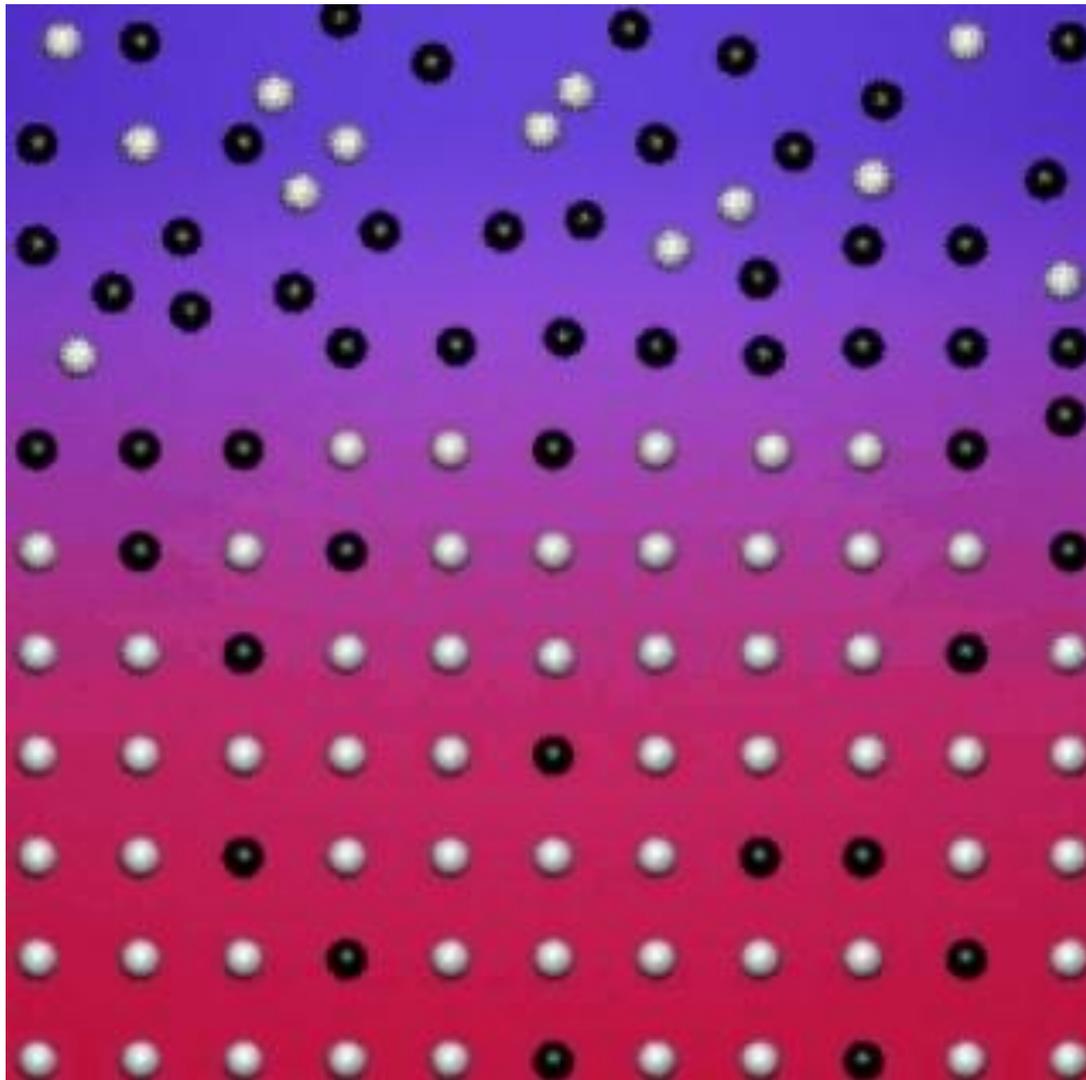
Randomly oriented slip planes

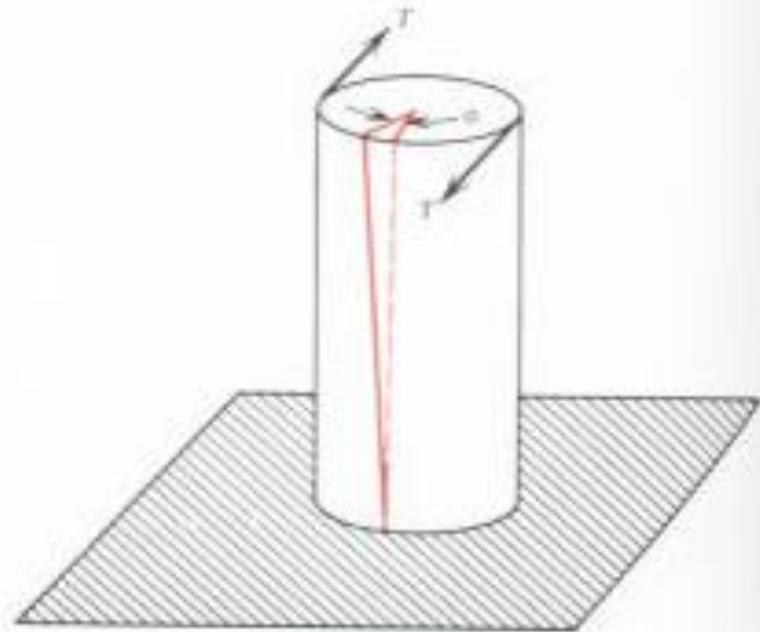
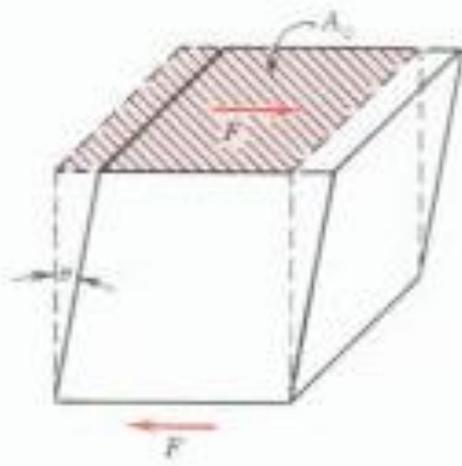
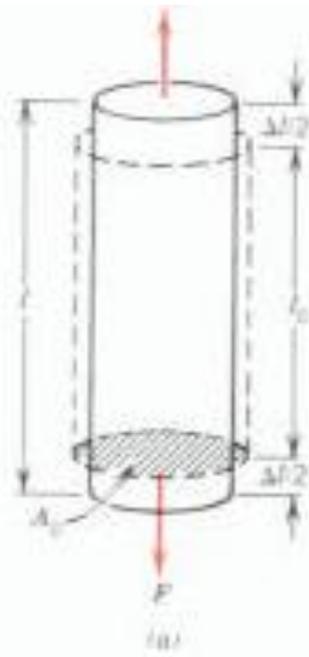
Oriented favourably

Oriented unfavourably

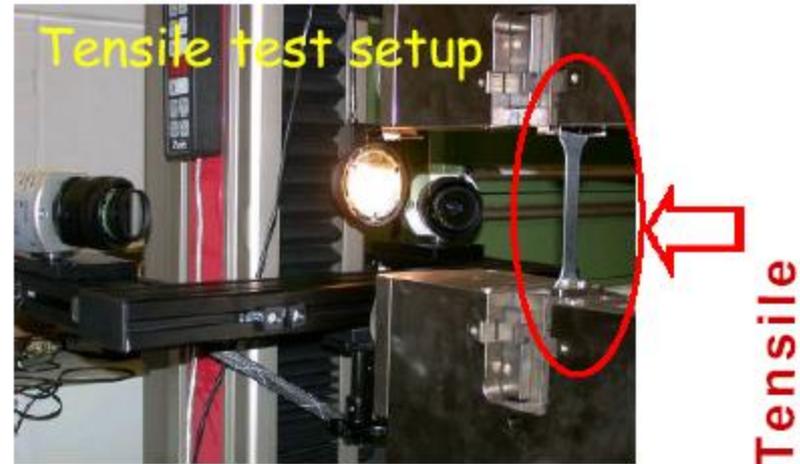
Orientation of slip planes.

Defectos puntuales

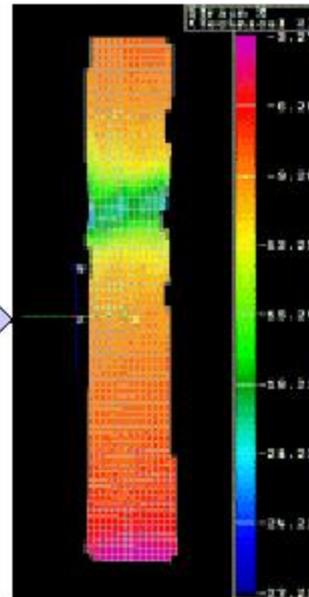
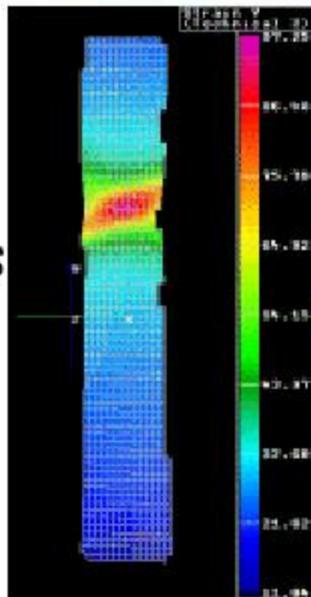




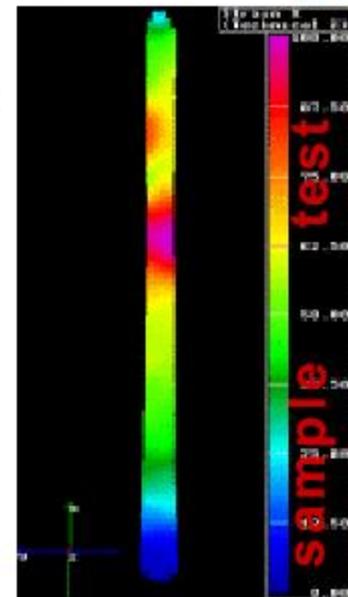
An example of recent **tensile testing** at DaimlerChrysler in, Germany.



Pictures of the sample as it was tested:

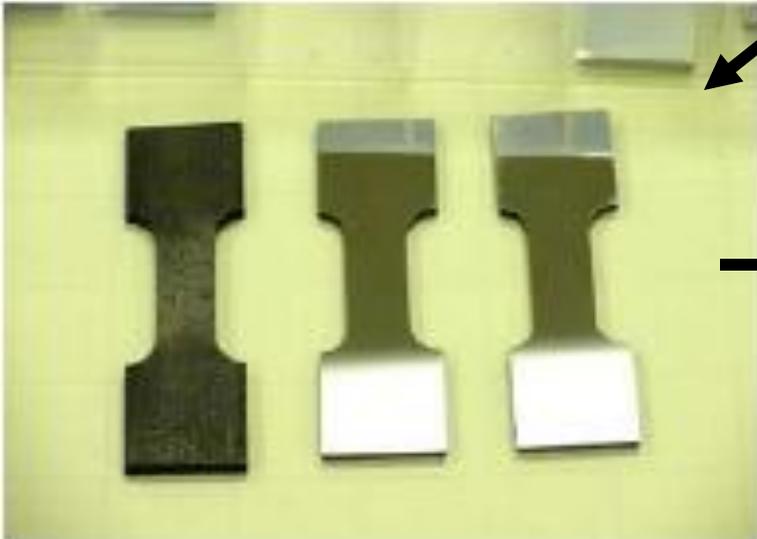
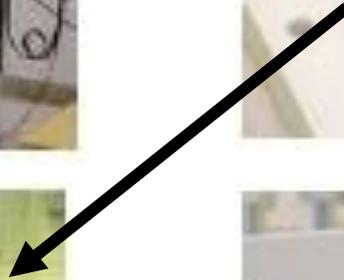
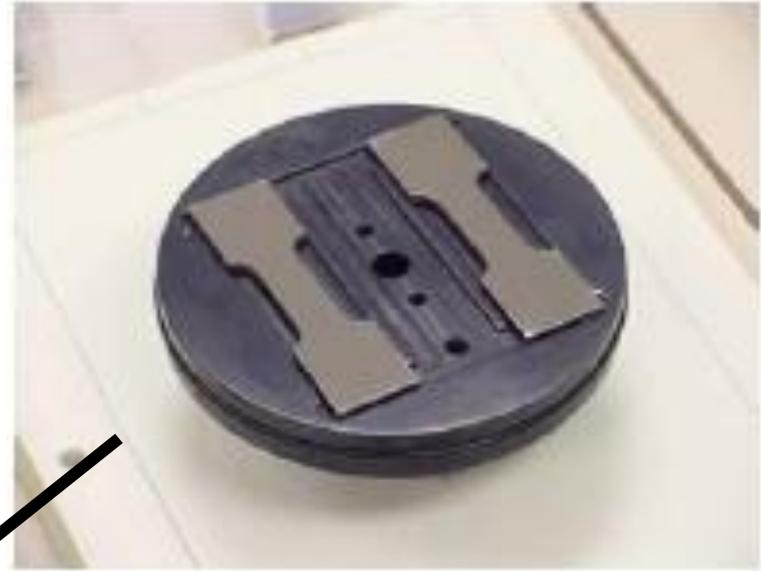
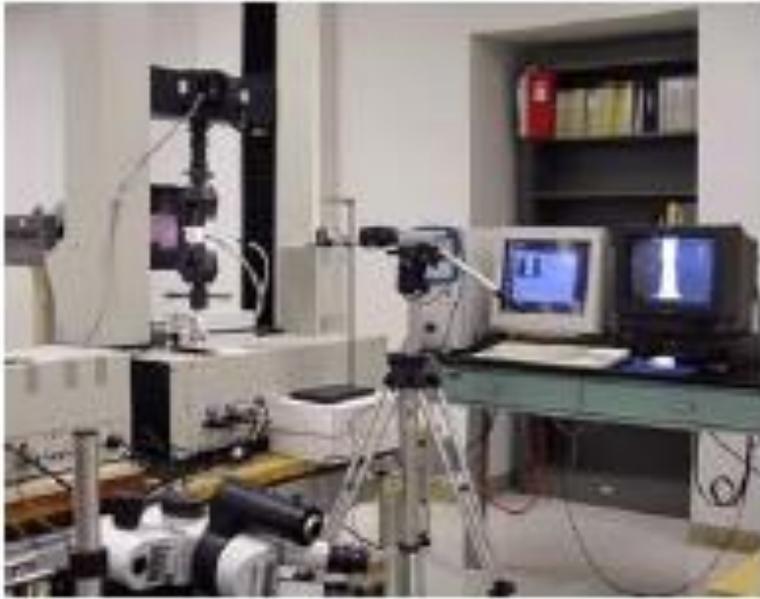


Side view of test

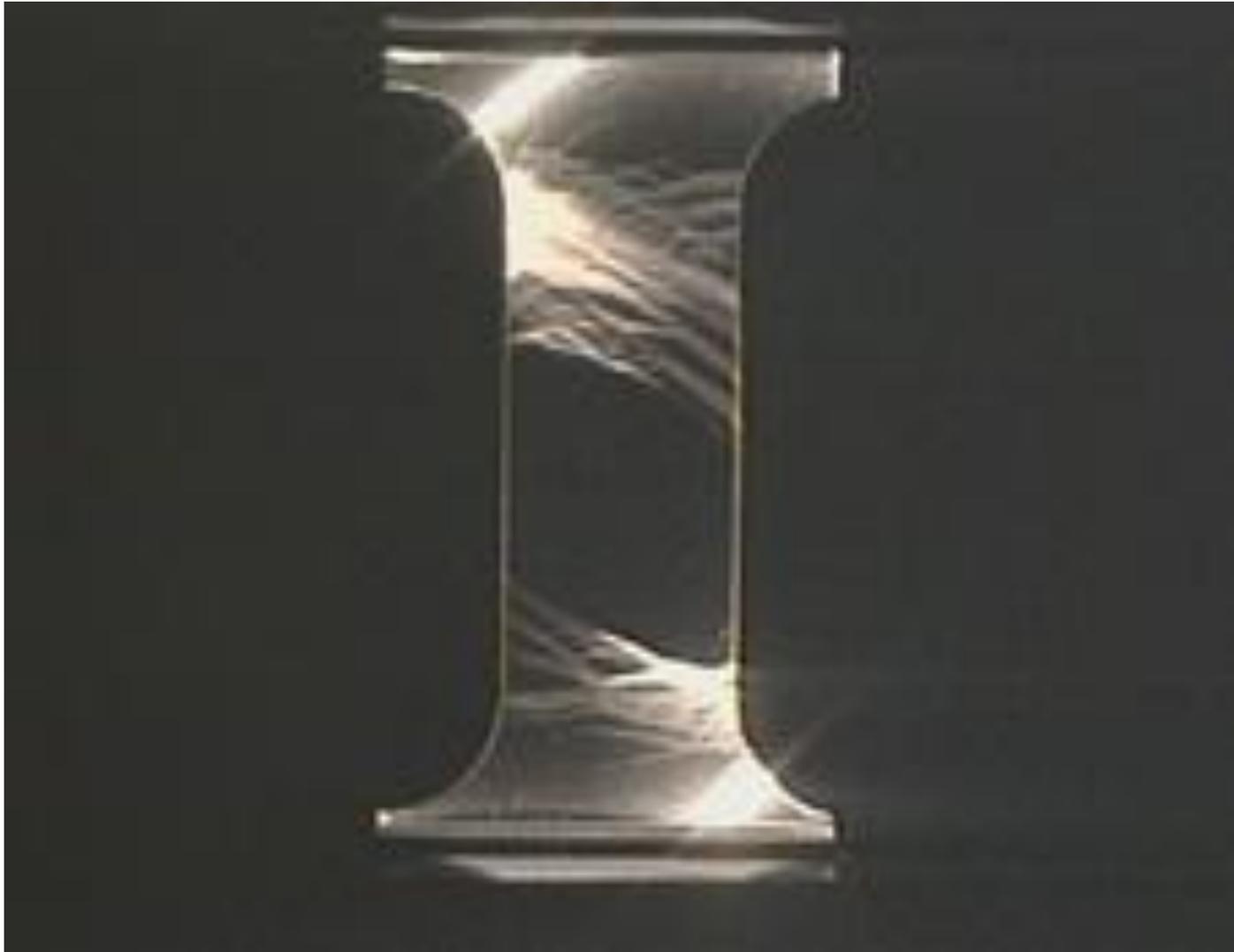




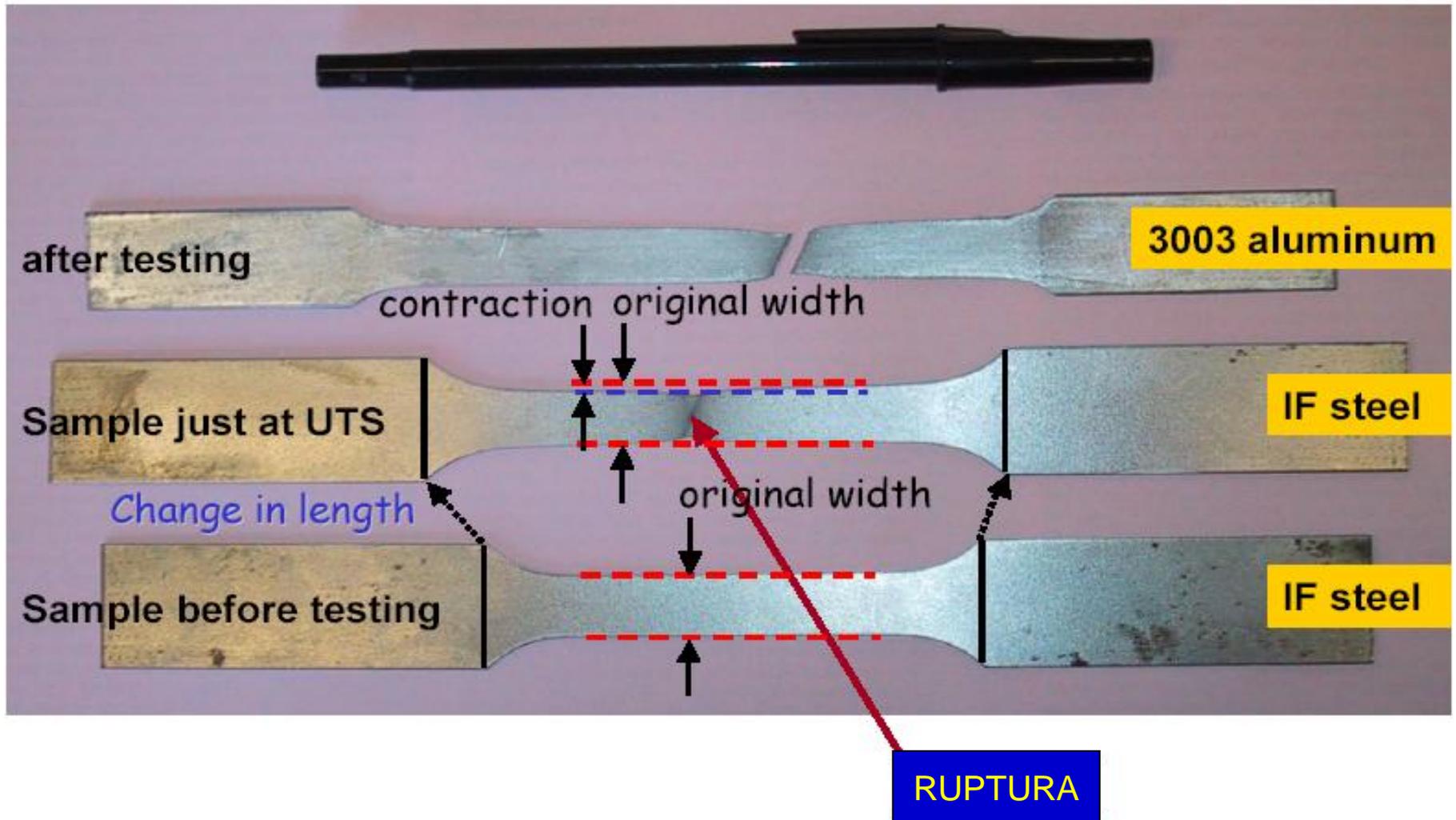
Prueba a la tensión



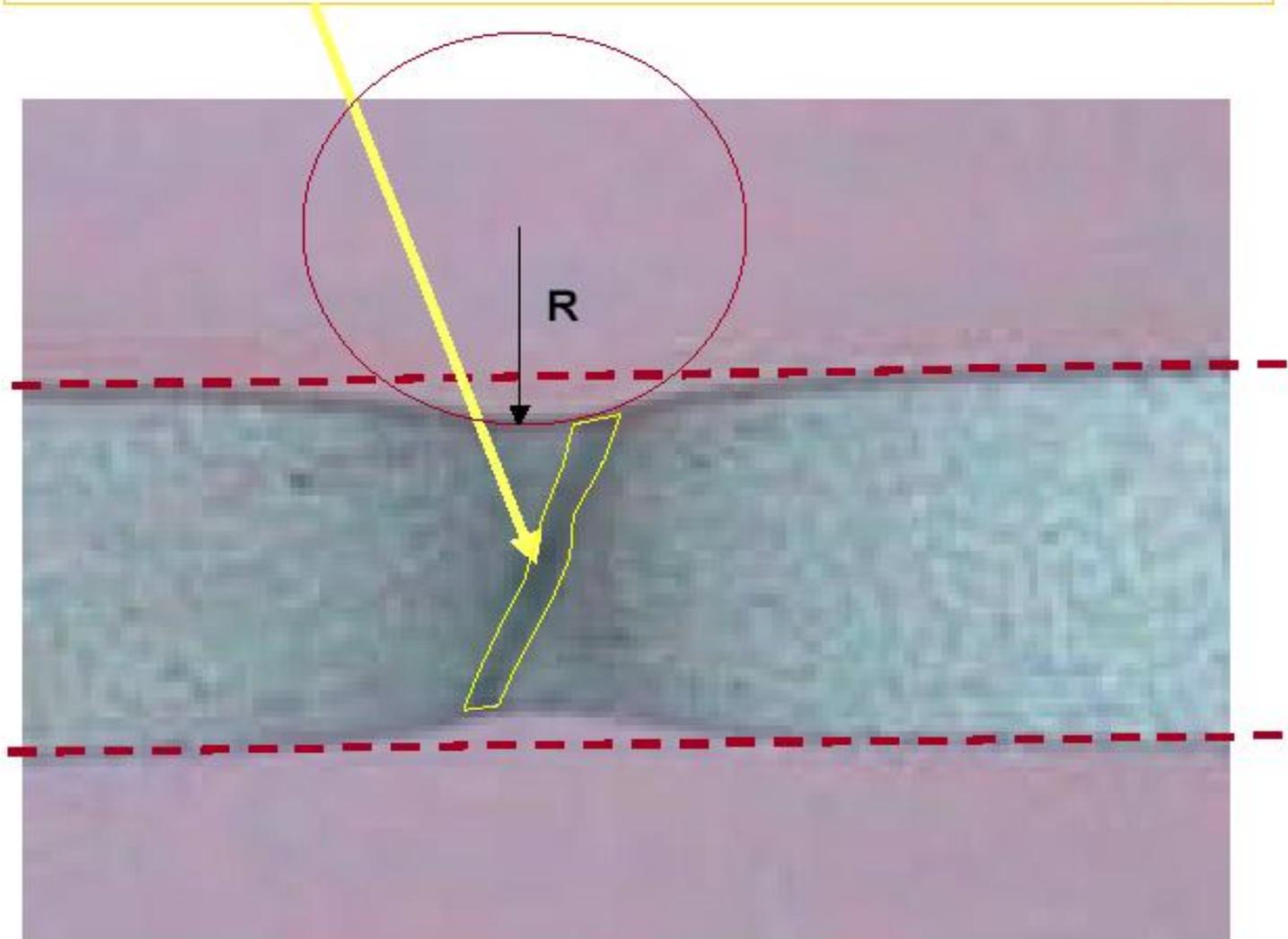
Vista de los planos de deslizamiento en la probeta

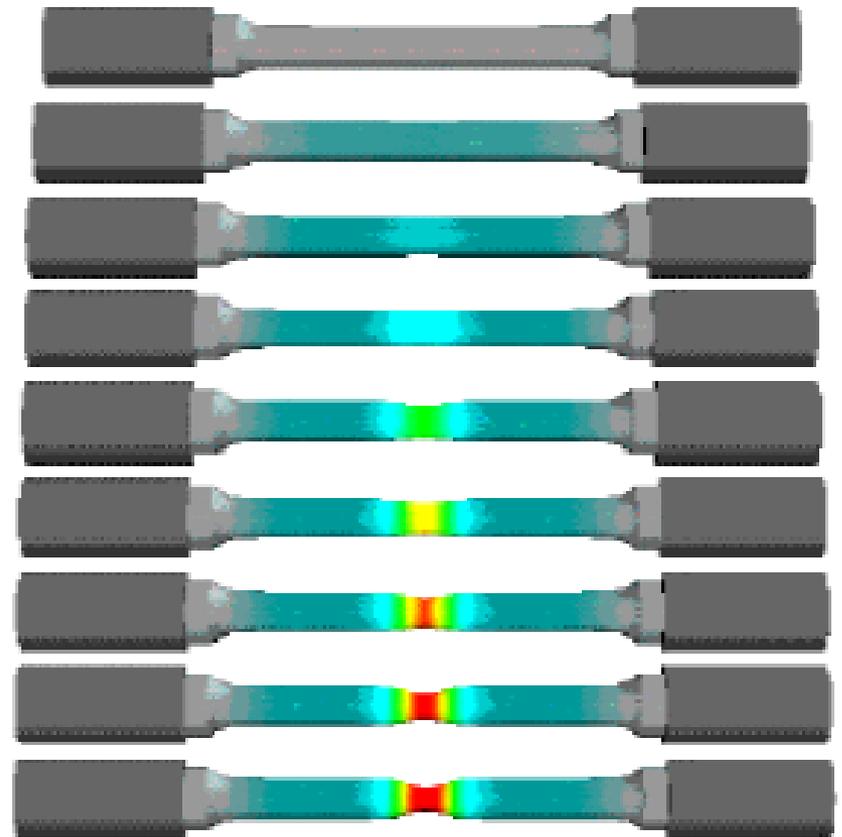


Ejemplo de prueba de esfuerzo a la tensión

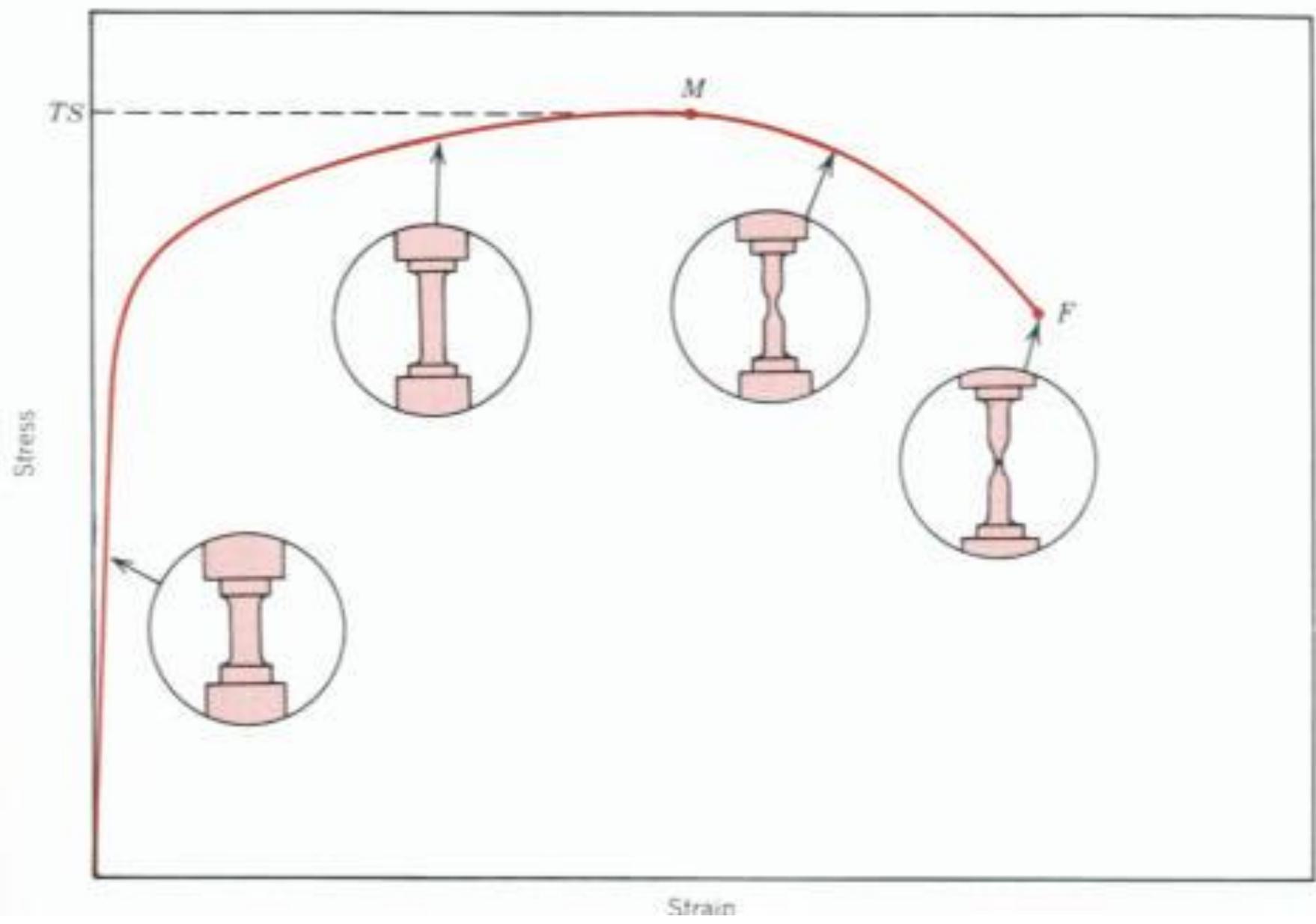


Localized, unstable deformation occurs at σ_{UTS}

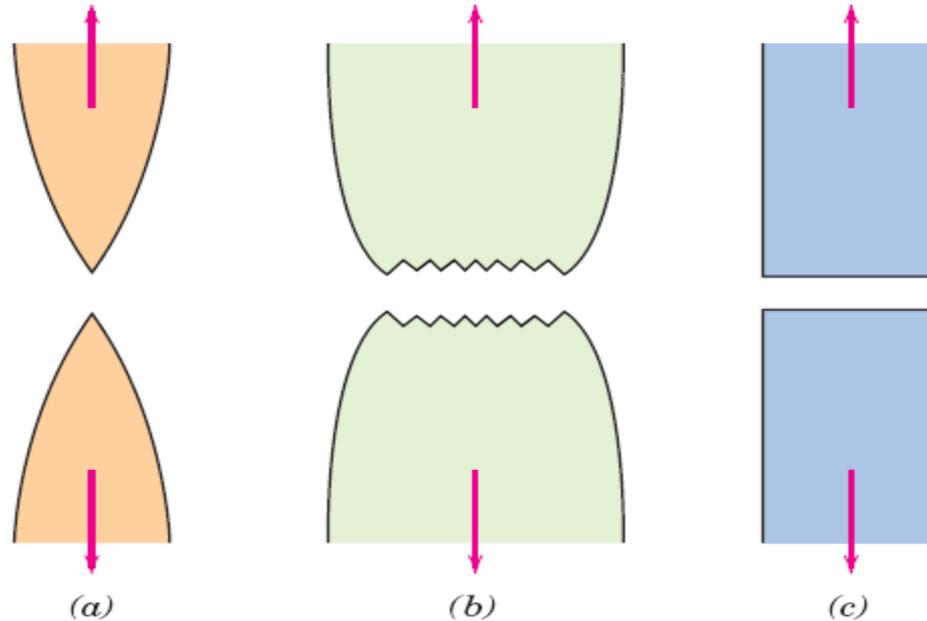




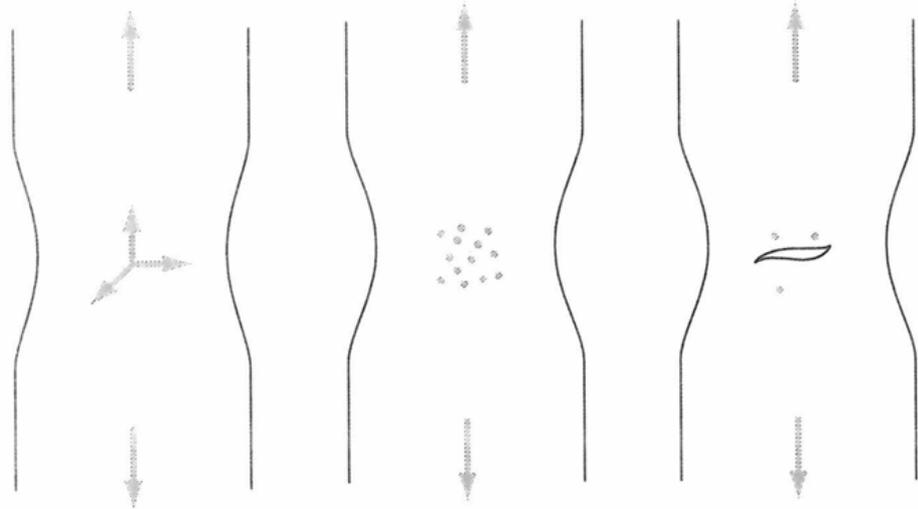
Evolución de las probetas rectangulares durante el ensayo de tracción (la zona central es la que soporta mayor deformación, y por esa zona romperá)



PROPIEDADES MECANICAS/ TIPOS FRACTURA



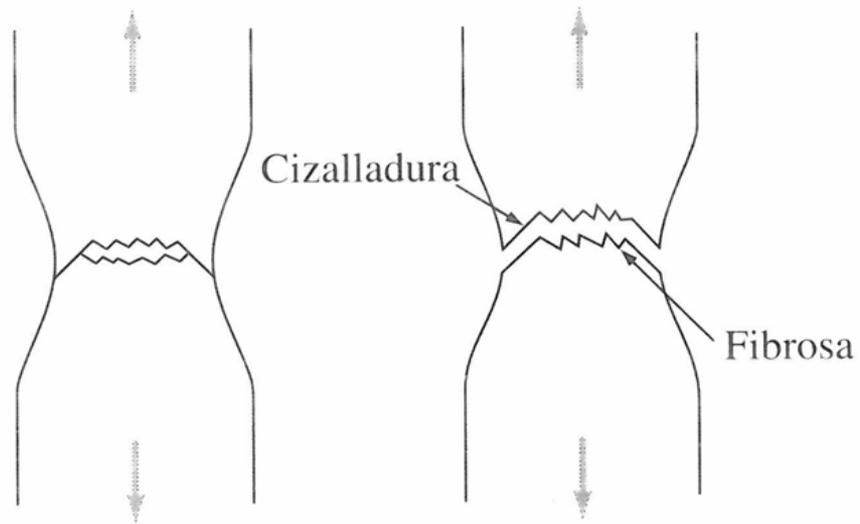
- (a).- Fractura muy dúctil en la cual la probeta experimenta el fenómeno de estricción hasta llegar a un punto
- (b).- Fractura moderadamente dúctil después de cierta estricción.
- (c).- Fractura frágil sin ninguna deformación plástica.



a)

b)

c)



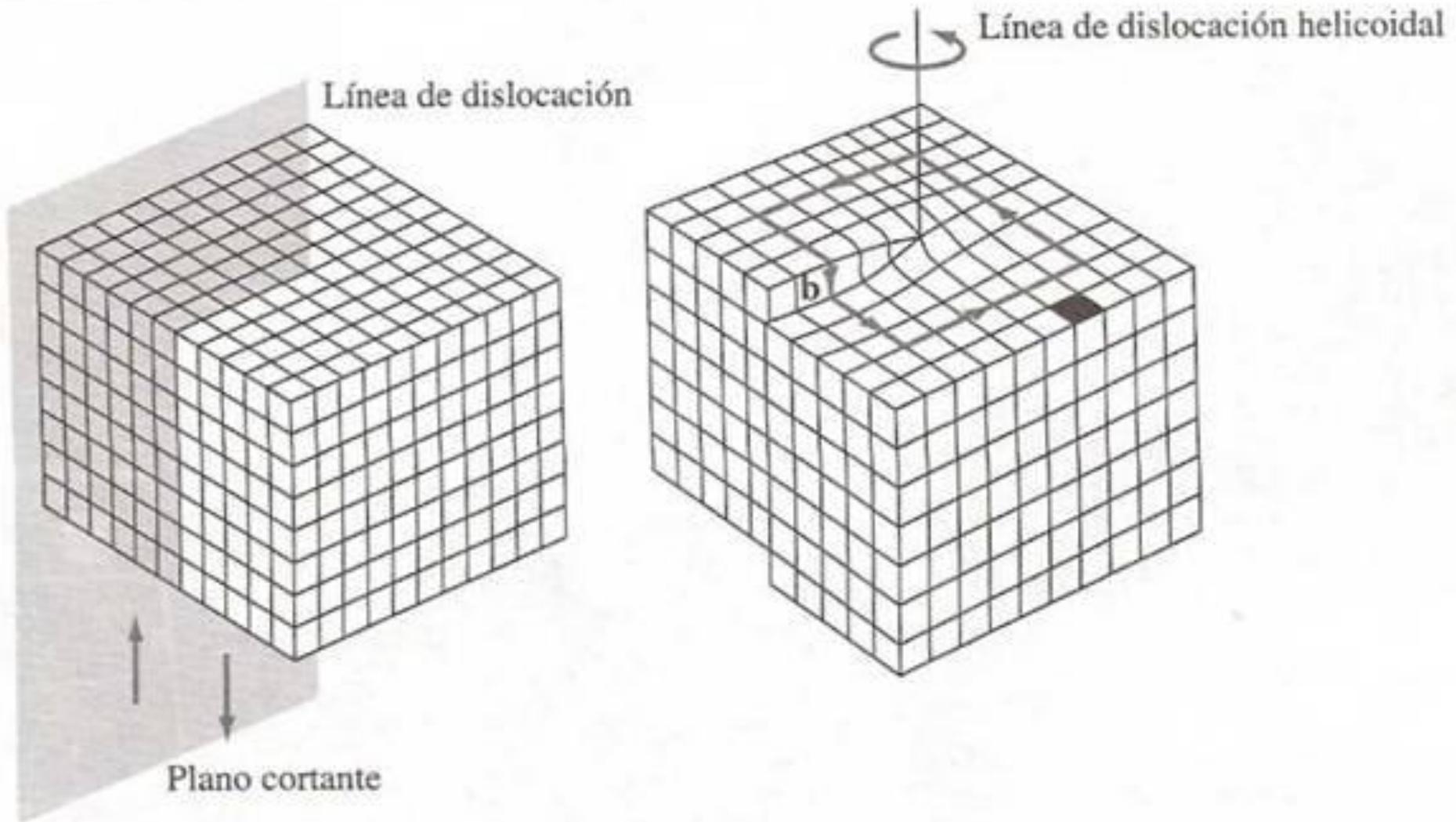
Cizalladura

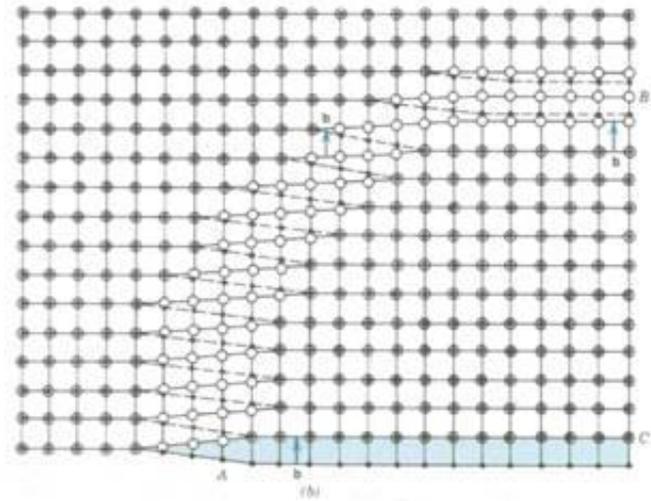
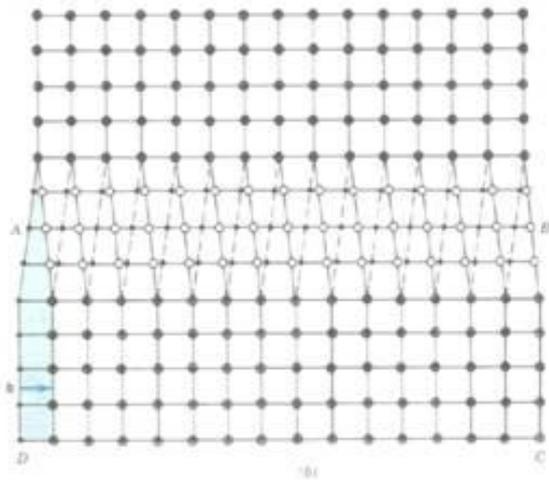
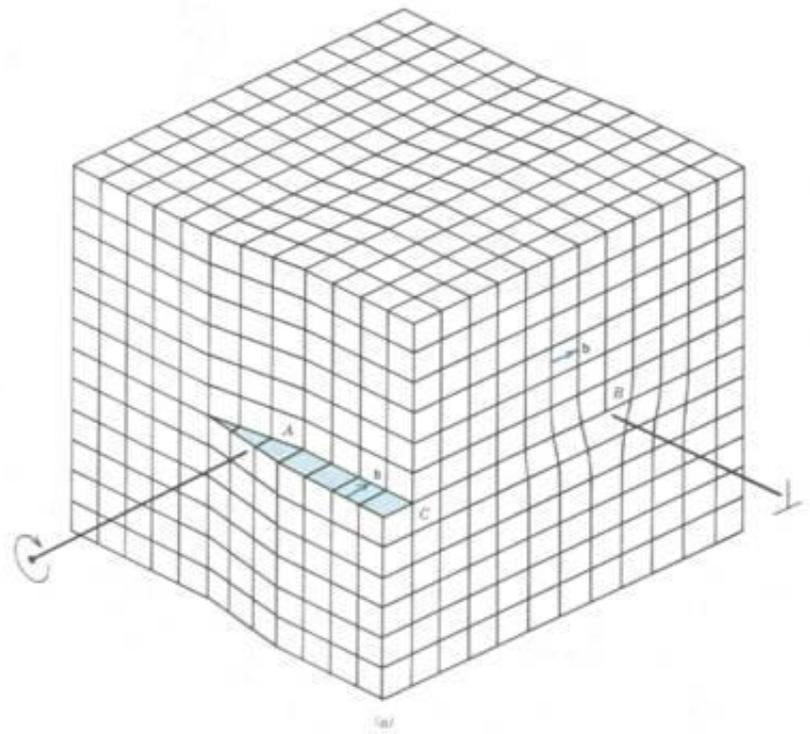
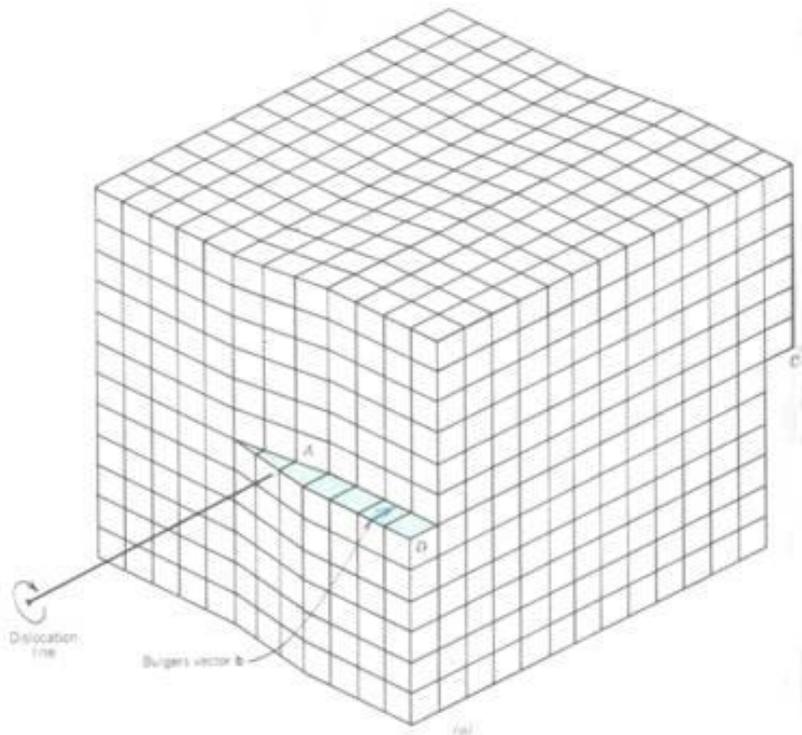
Fibrosa

d)

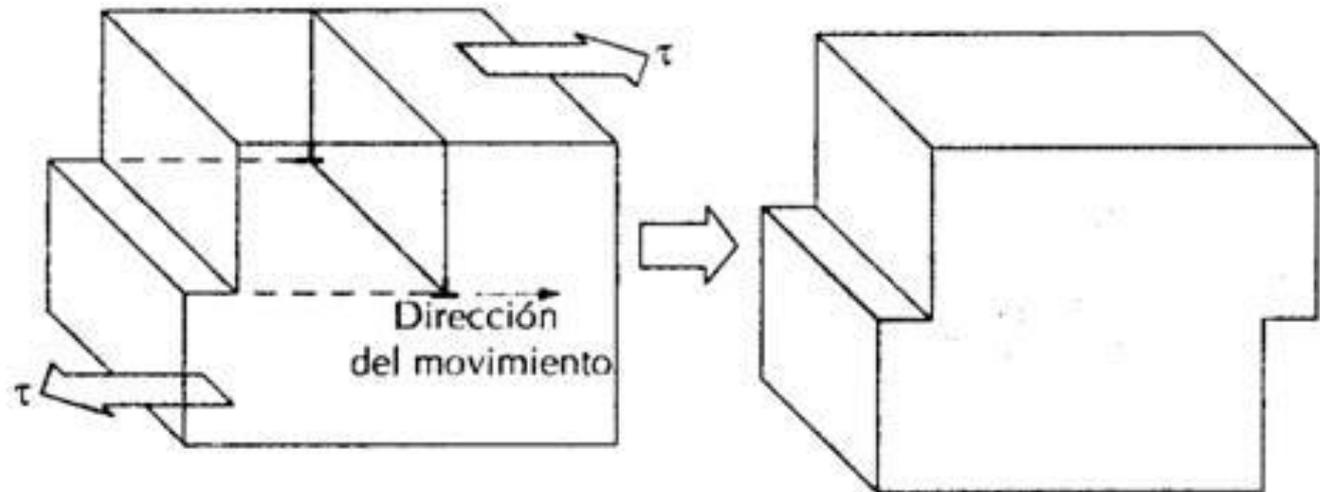
e)

DISLOCACIONES

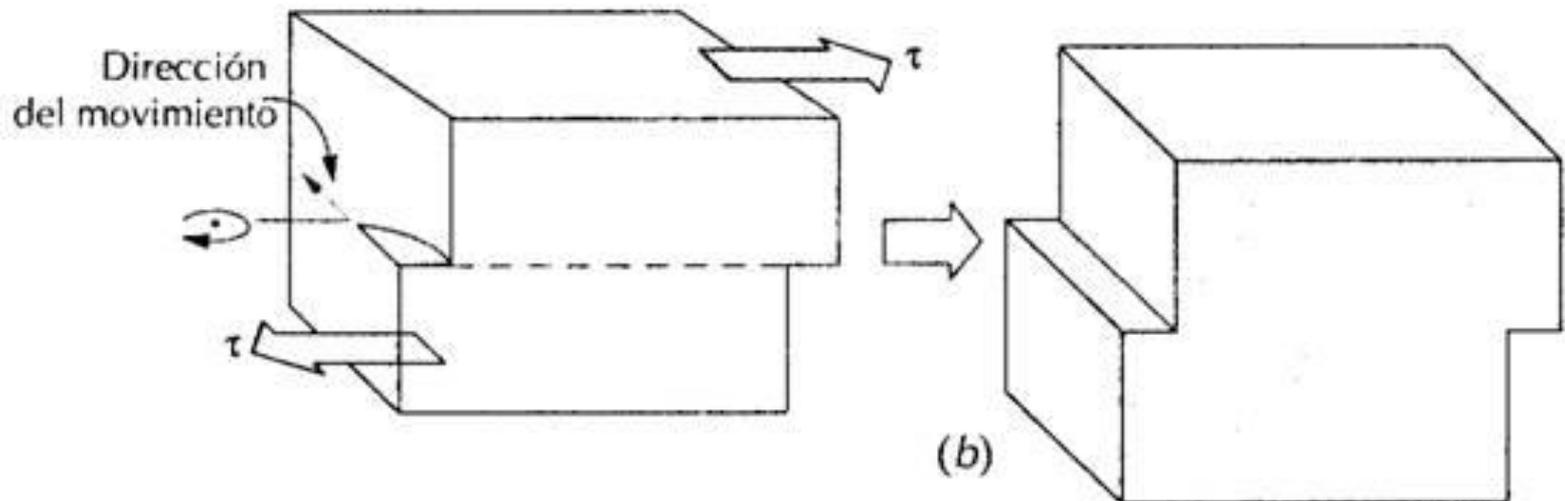




ARISTA PURA Y TORNILLO PURA DAN LOS MISMOS ESCALONES DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA

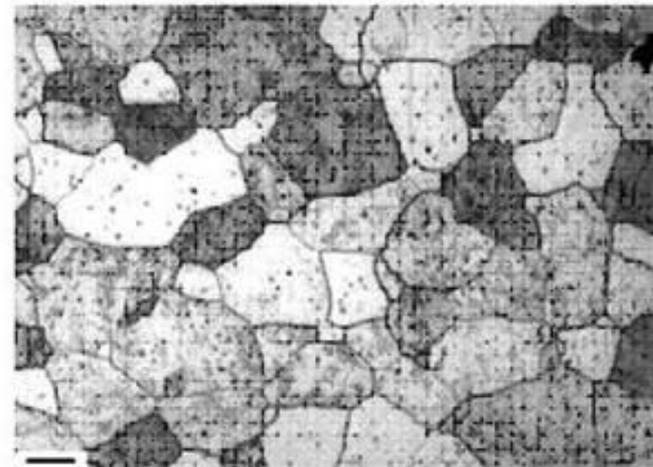
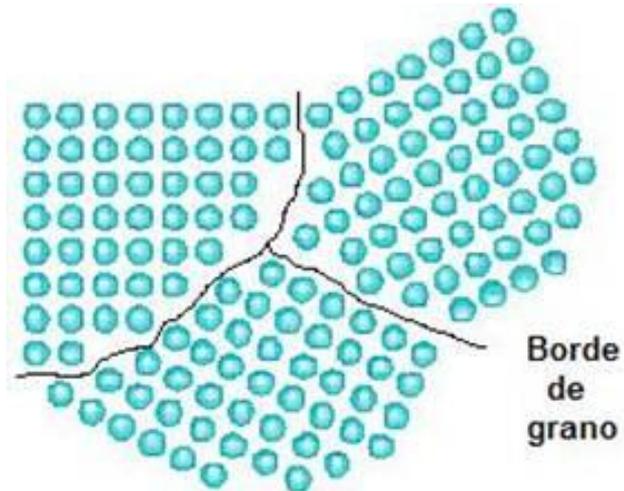
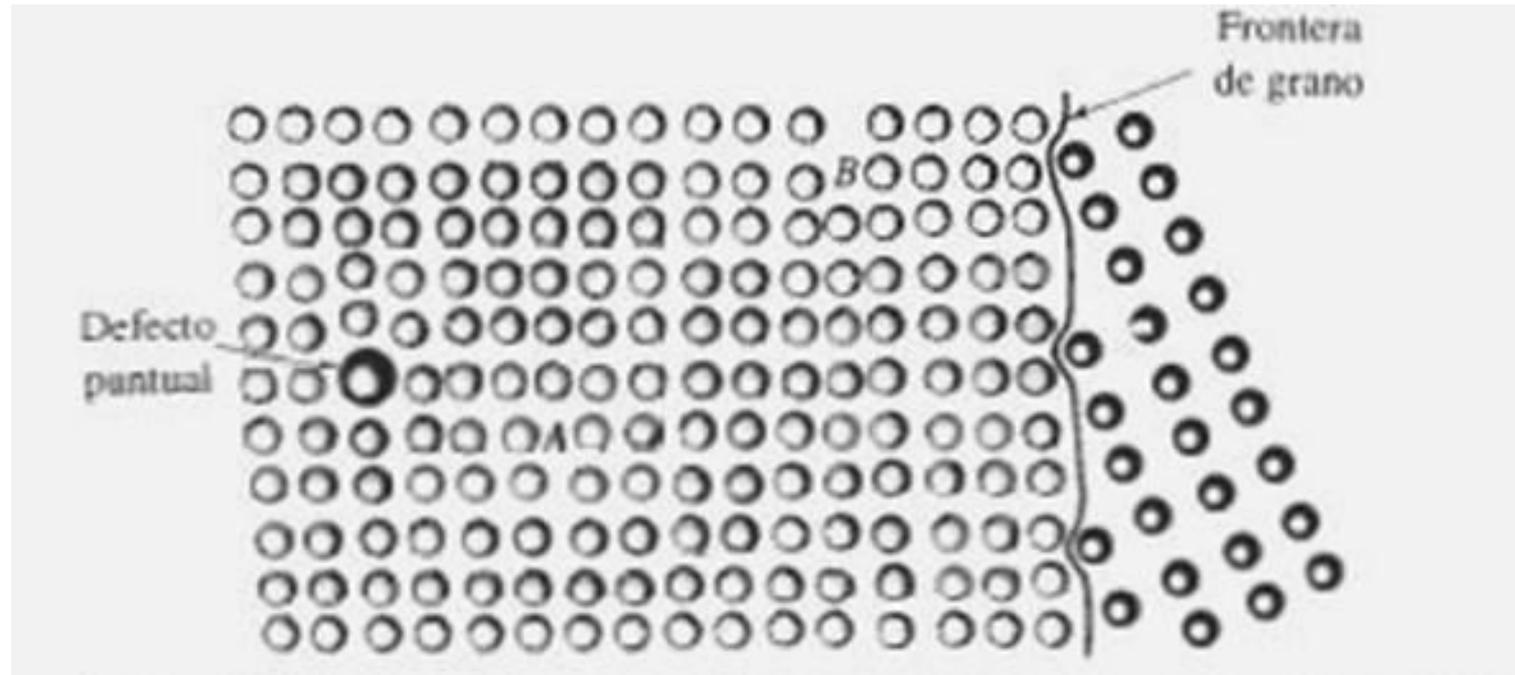


(a)



(b)

Borde de grano



(b)

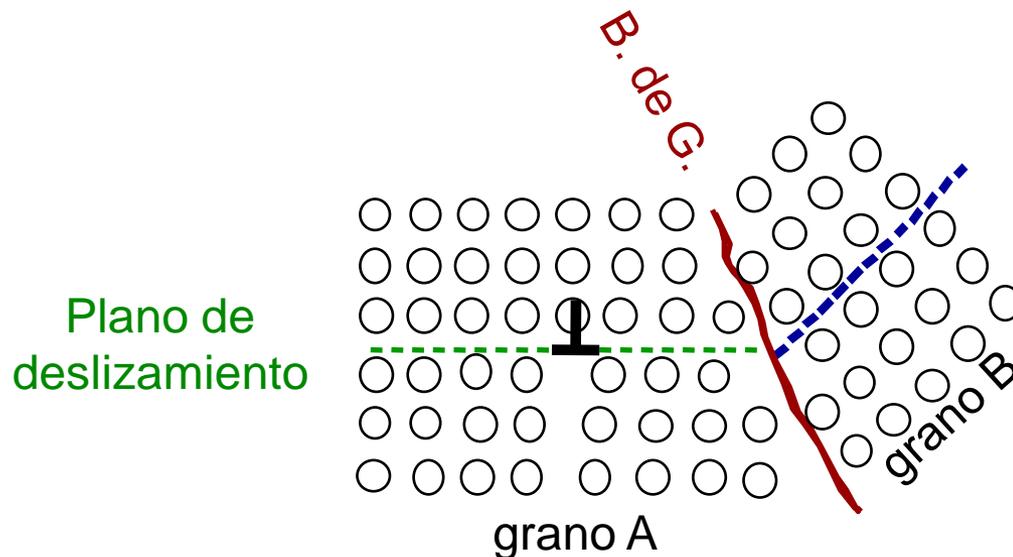
Mecanismos de Endurecimiento:

1) Reducción del Tamaño de Grano

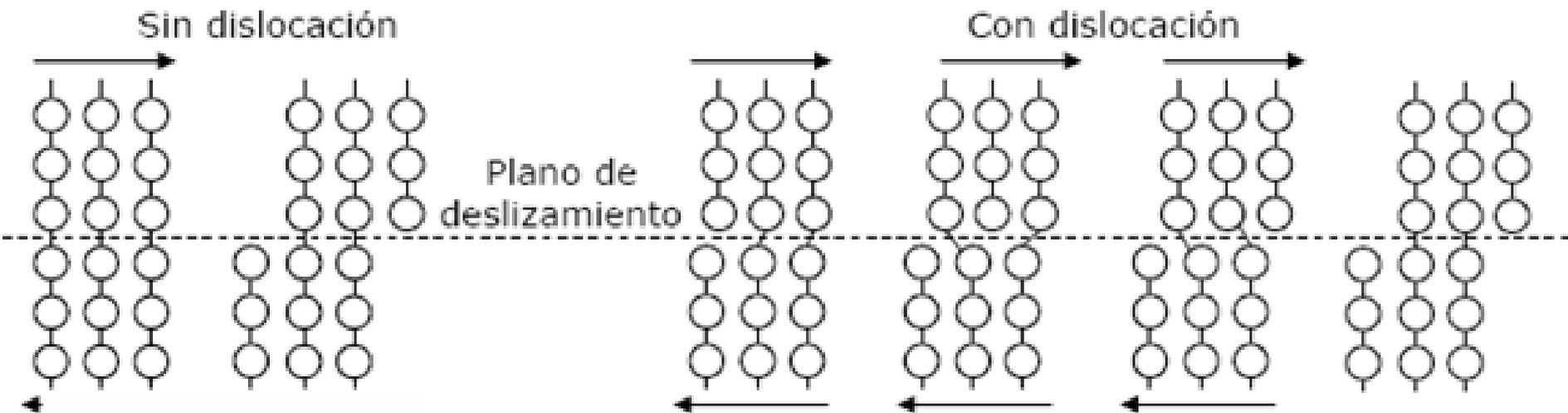
Los bordes de grano actúan como barreras al movimiento de las dislocaciones.

→ Las dislocaciones deben cambiar la dirección de deslizamiento al pasar a otro grano

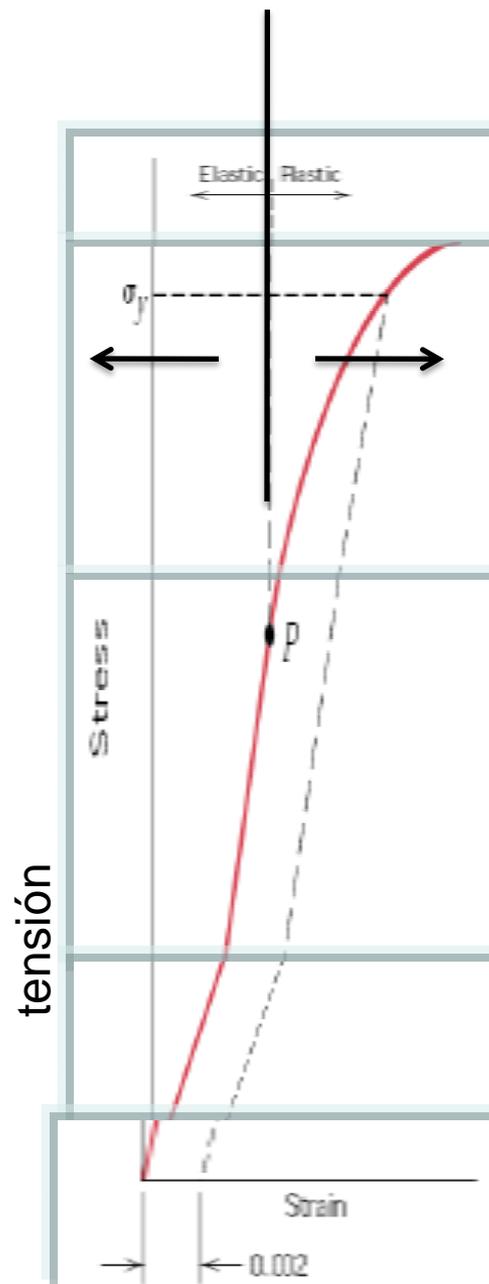
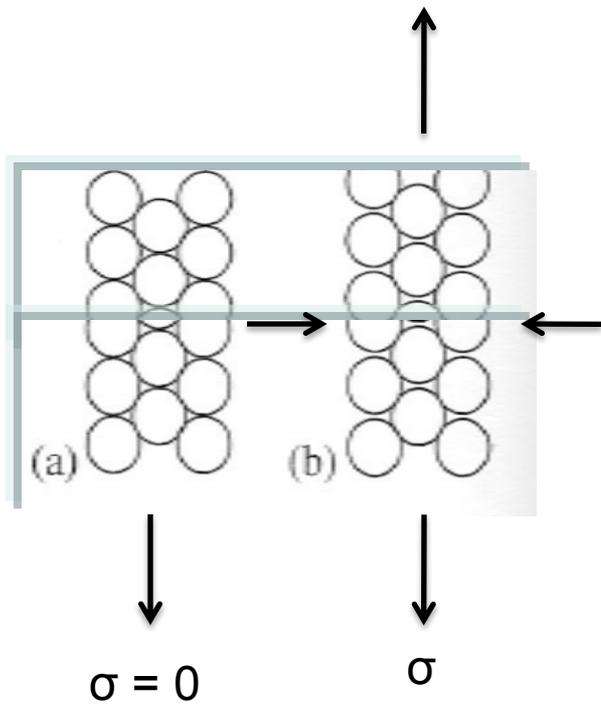
→ Los bordes de grano son una región desordenada de átomos, existiendo una discontinuidad en los planos de deslizamiento.



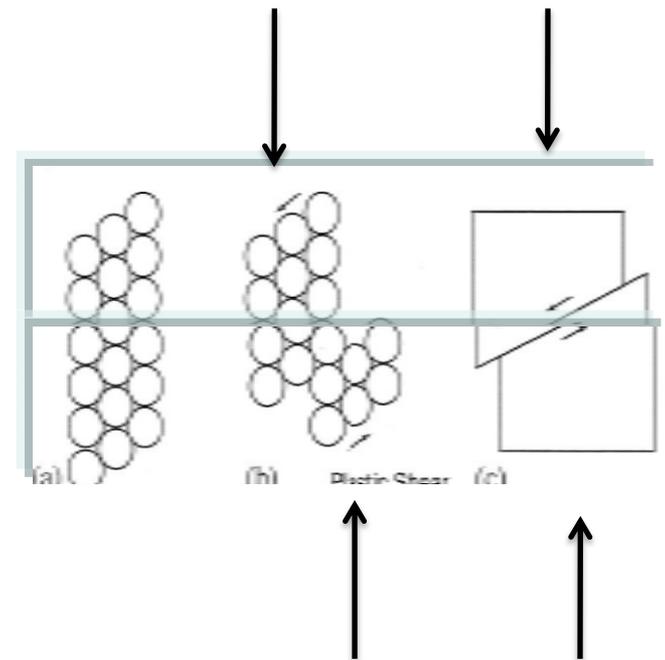
CORRIMIENTO DE PLANOS EN LA DISLOCACIÓN



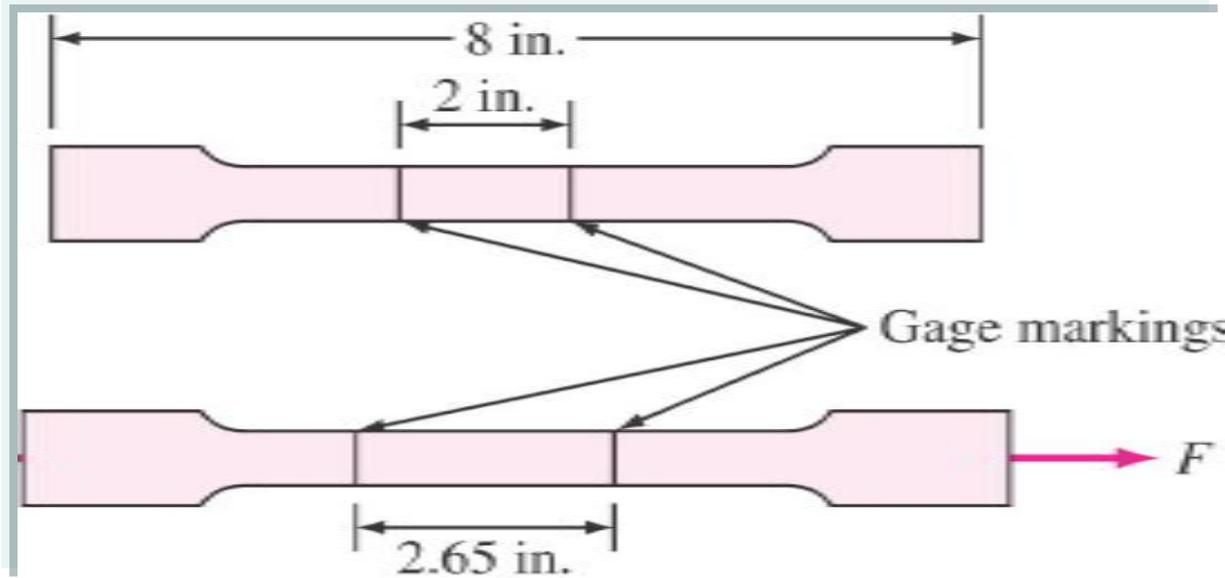
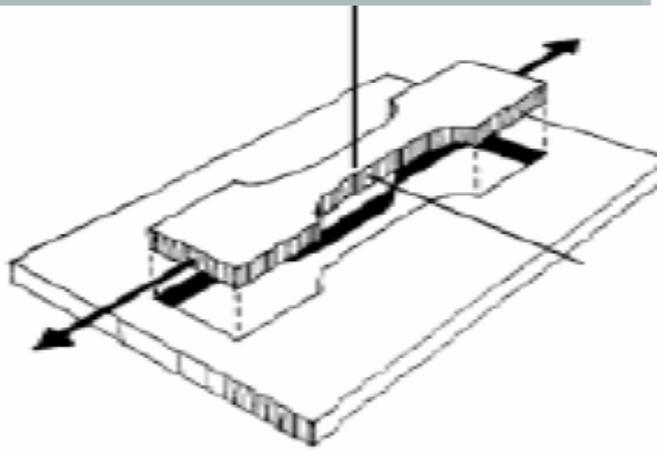
Deformación elástica



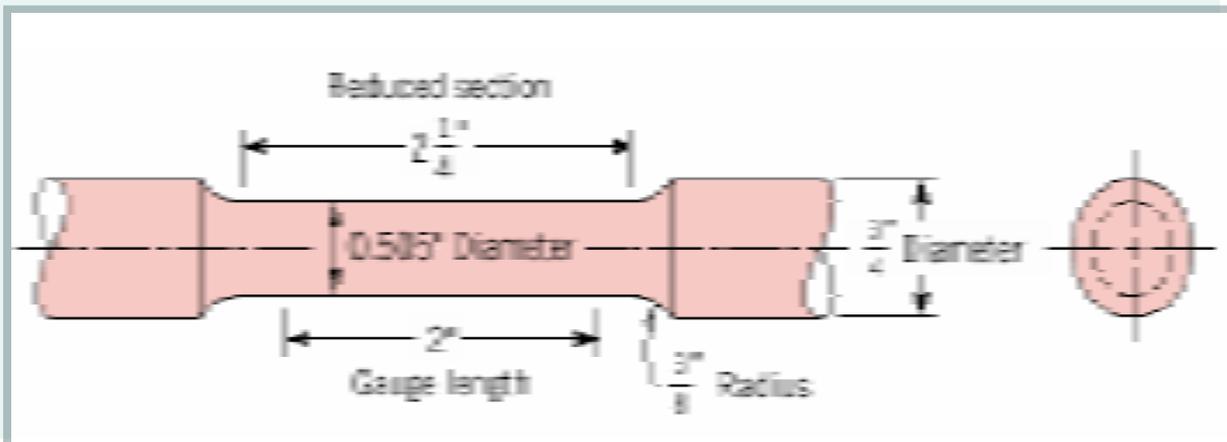
Deformación plástica



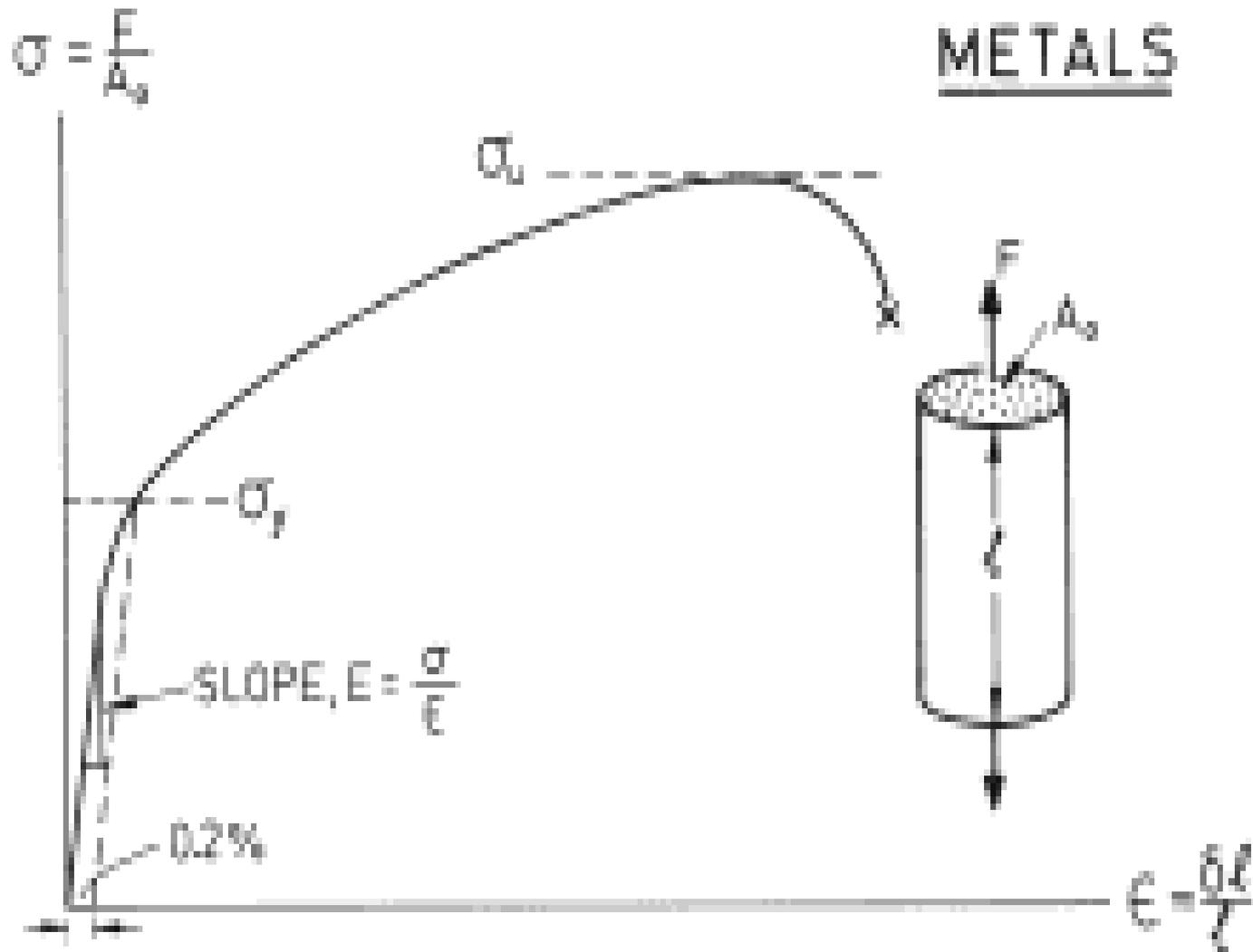
Rectangulares



Cilíndricas



Curva de carga-deformación de los metales



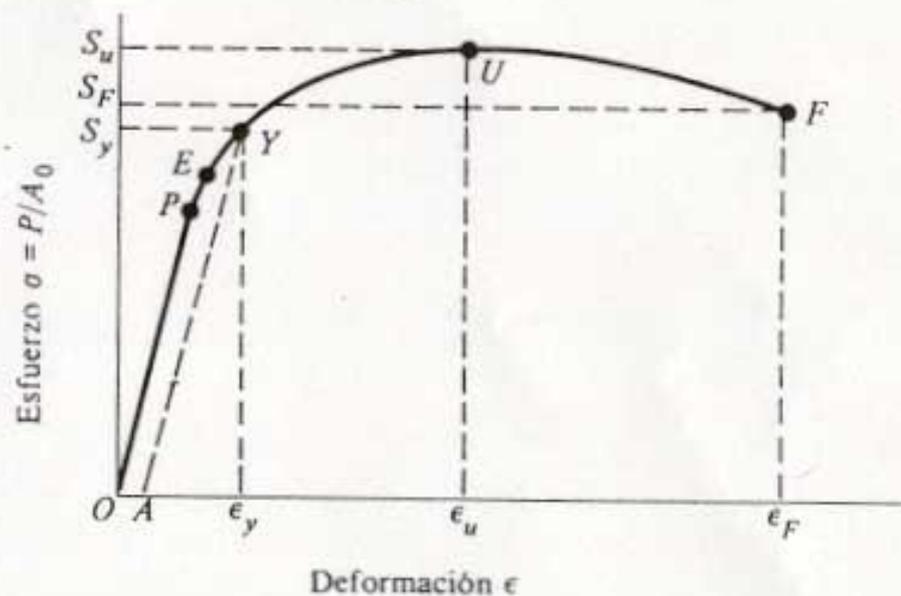
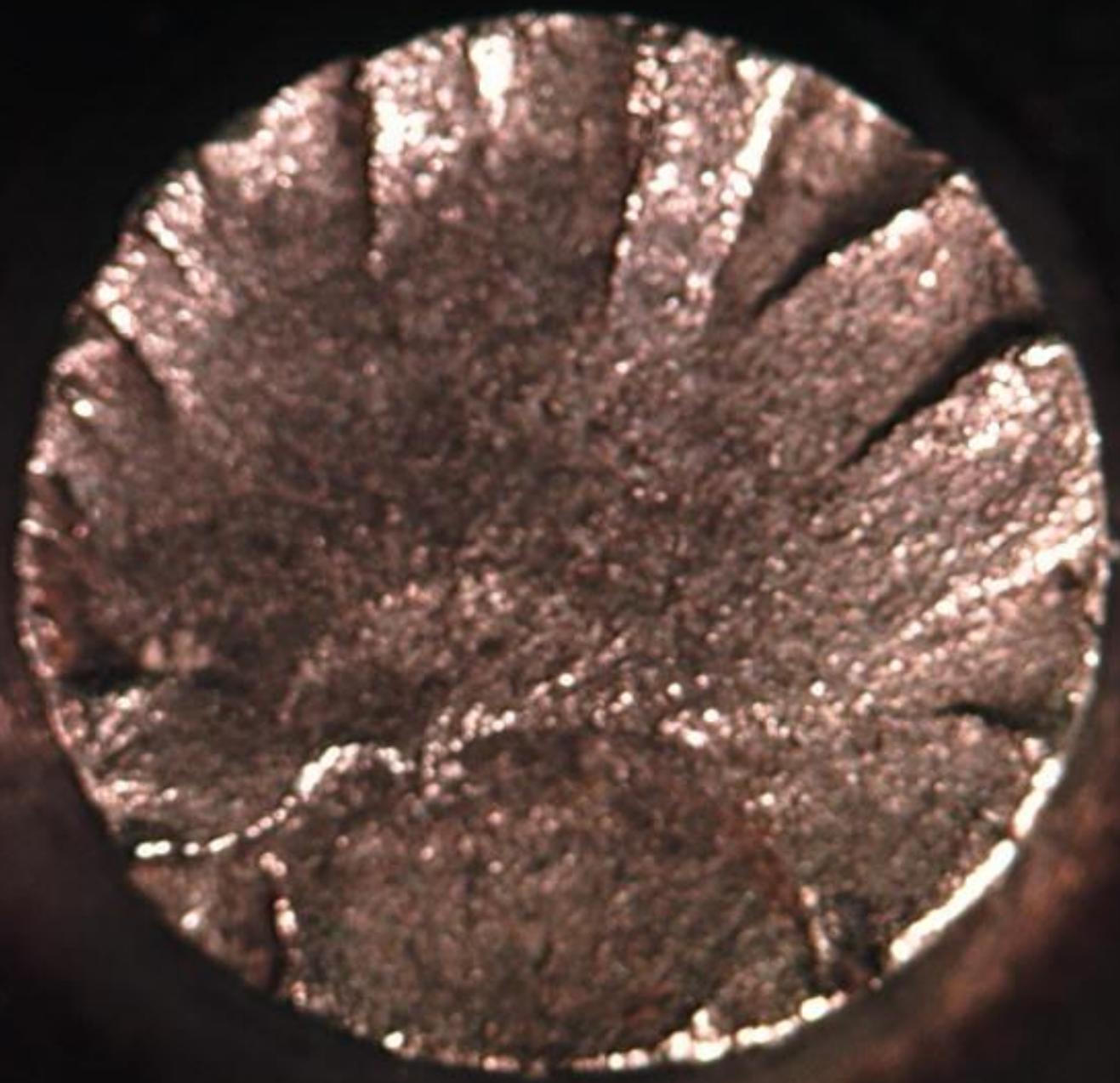
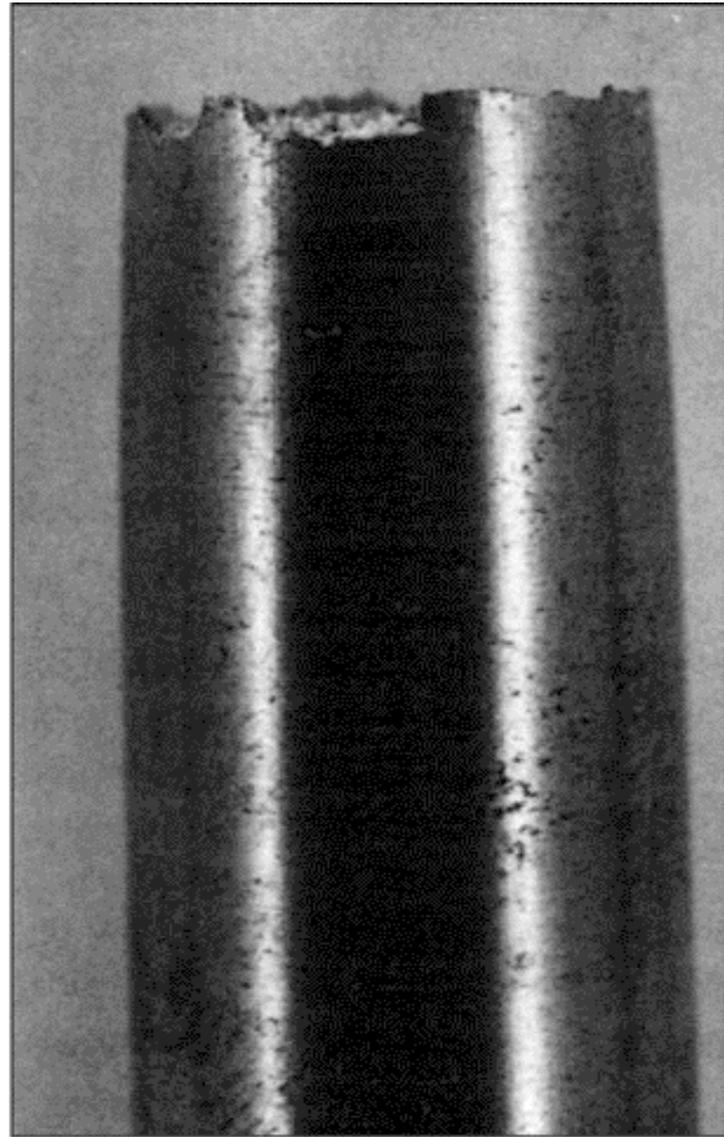
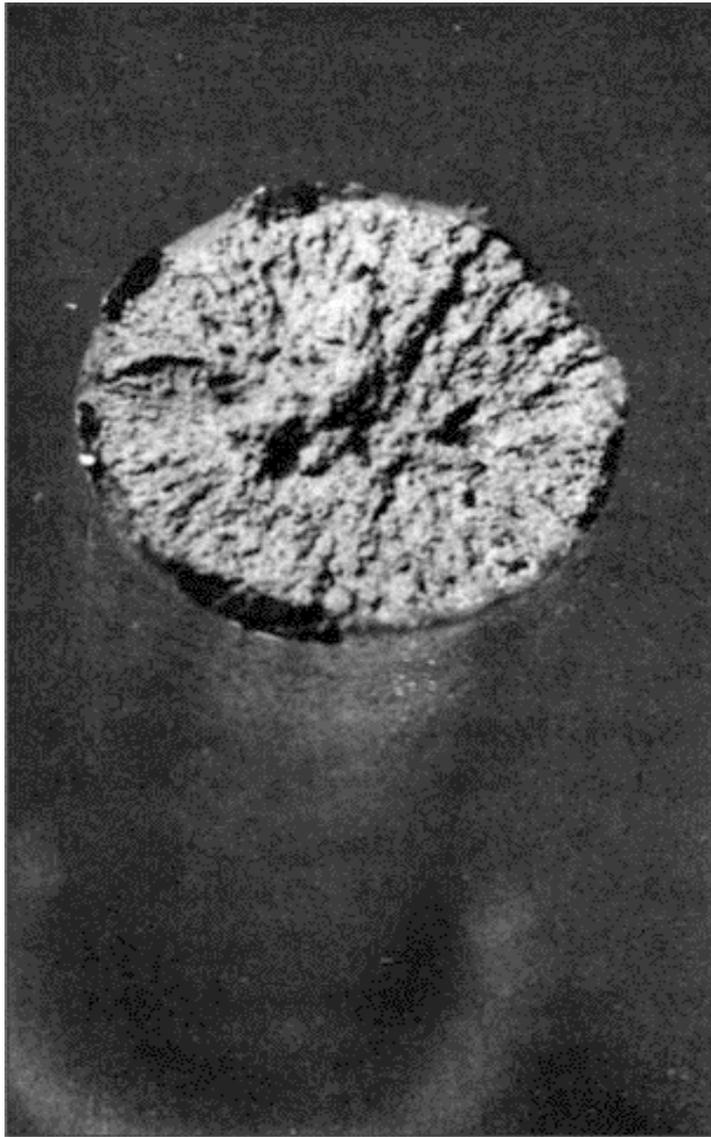


FIGURA 5-2

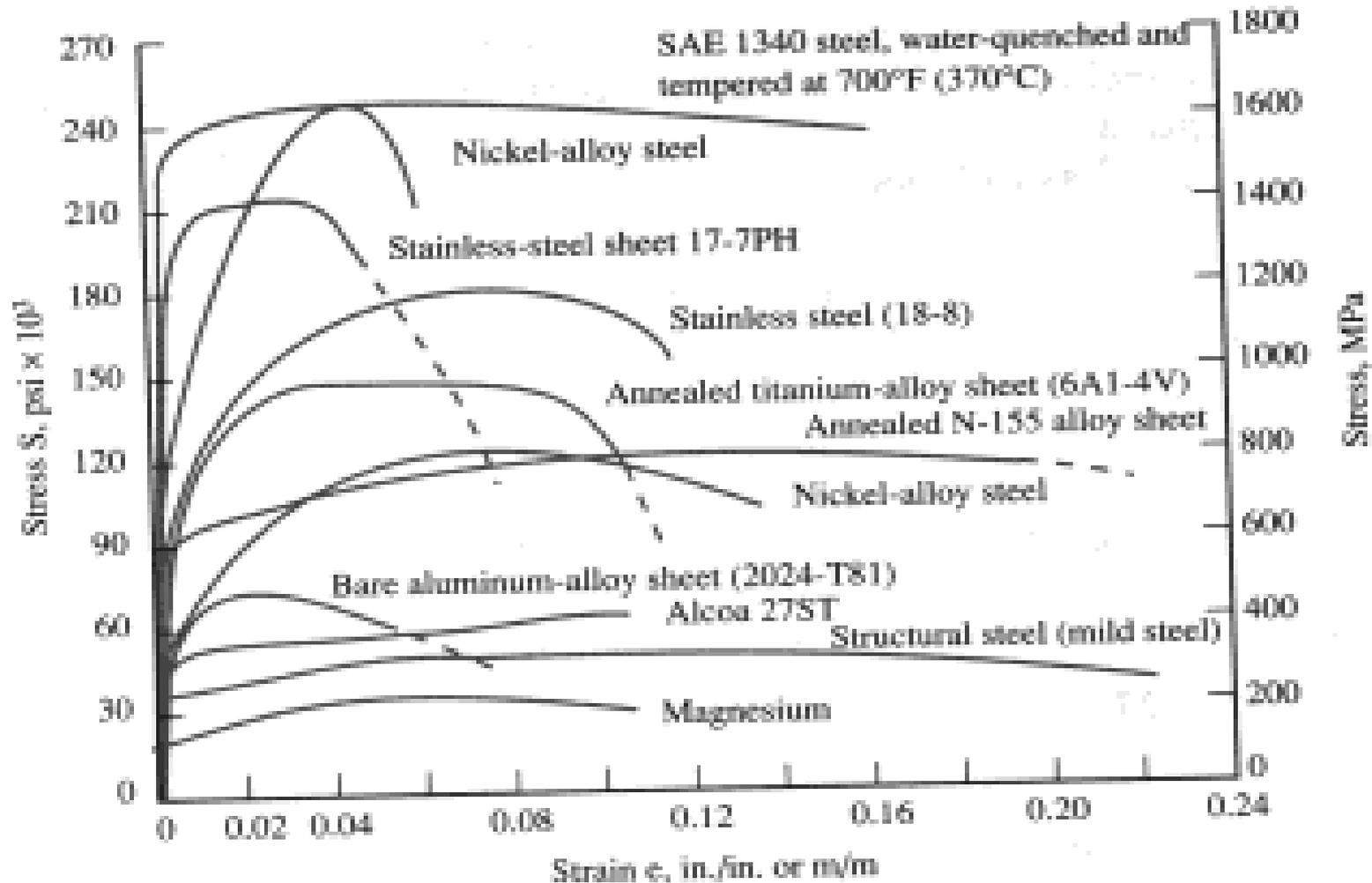
Diagrama esfuerzo-deformación obtenido a partir del ensayo normal a la tensión de un material dúctil. El punto P indica el límite proporcional; E , el límite elástico Y , la resistencia de fluencia convencional determinada por corrimiento paralelo (*offset*) según la deformación seleccionada OA ; U , la resistencia última o máxima, y F , el esfuerzo de fractura o ruptura.





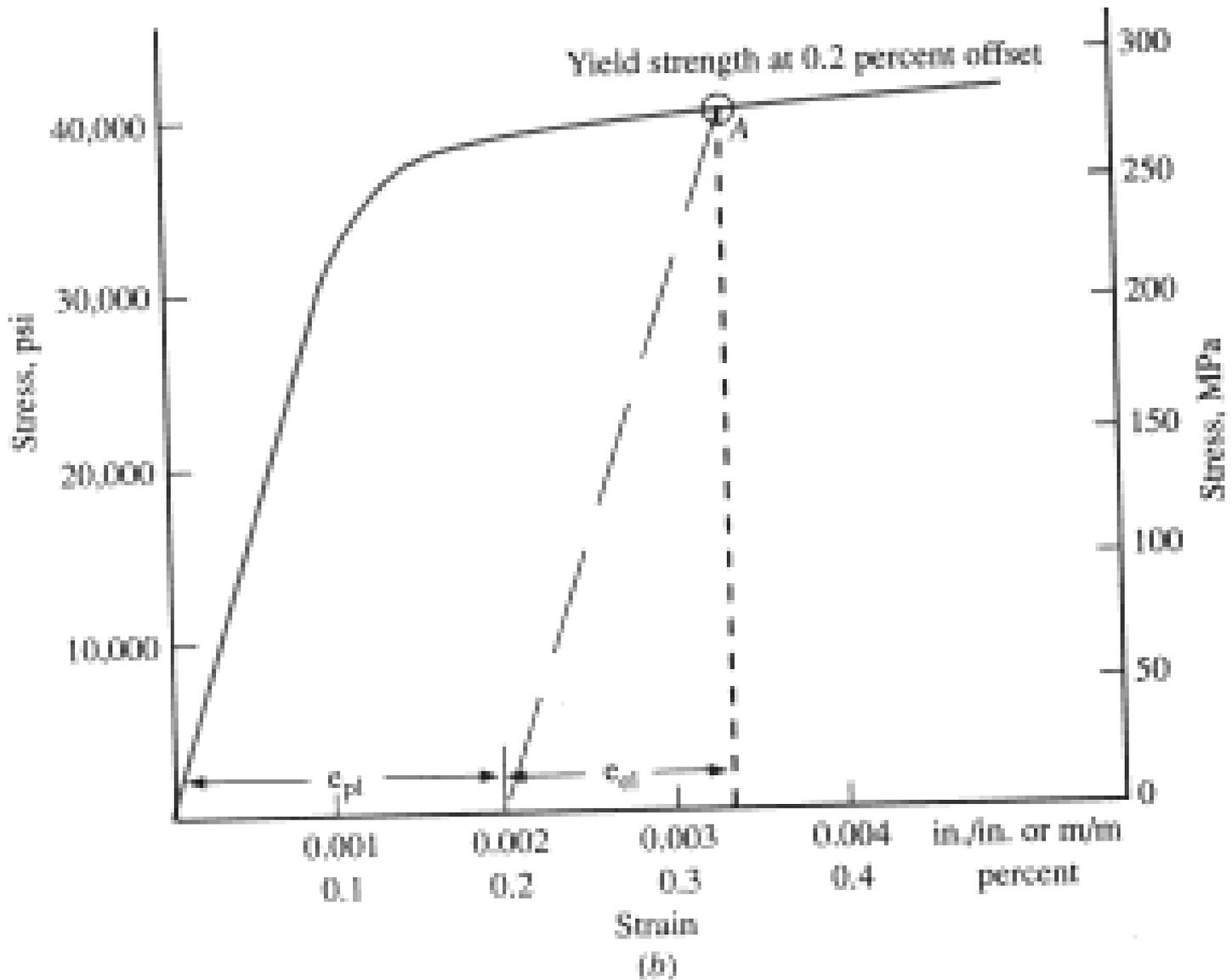
Fractura frágil de una aleación metálica que muestra surcos radiales que emanan del centro del espécimen.

Curva de carga-deformación de aleaciones metálicas



(a)

Detalles de 0.2% para un acero laminado (0.3% de carbón)

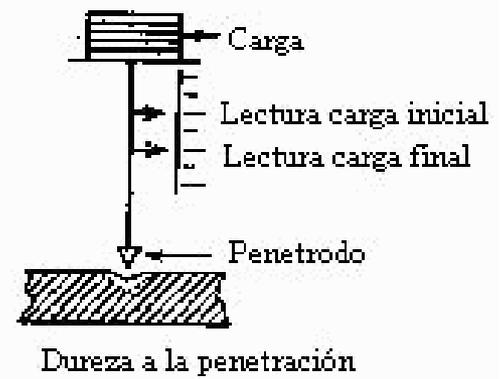
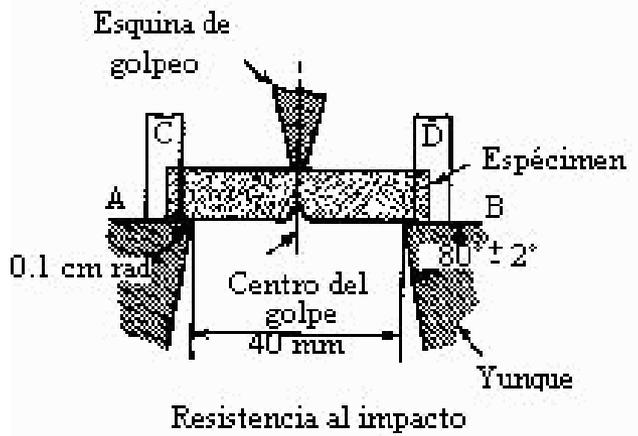
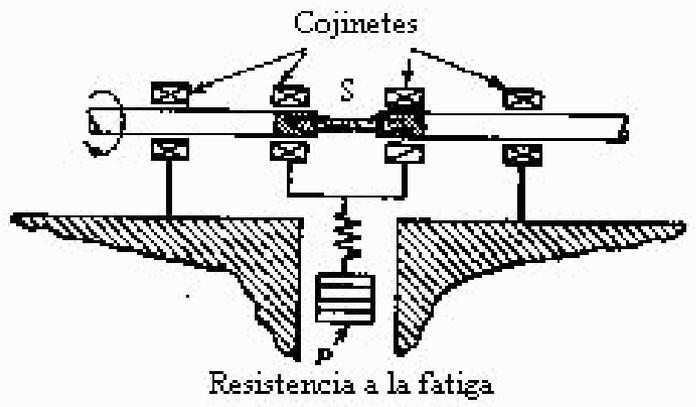
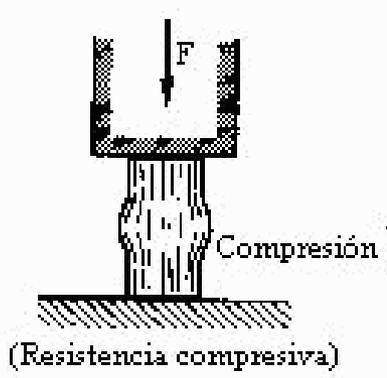
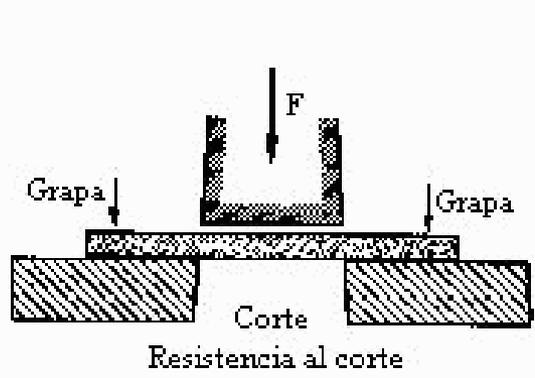


Curvas de carga-deformación de aceros de construcción

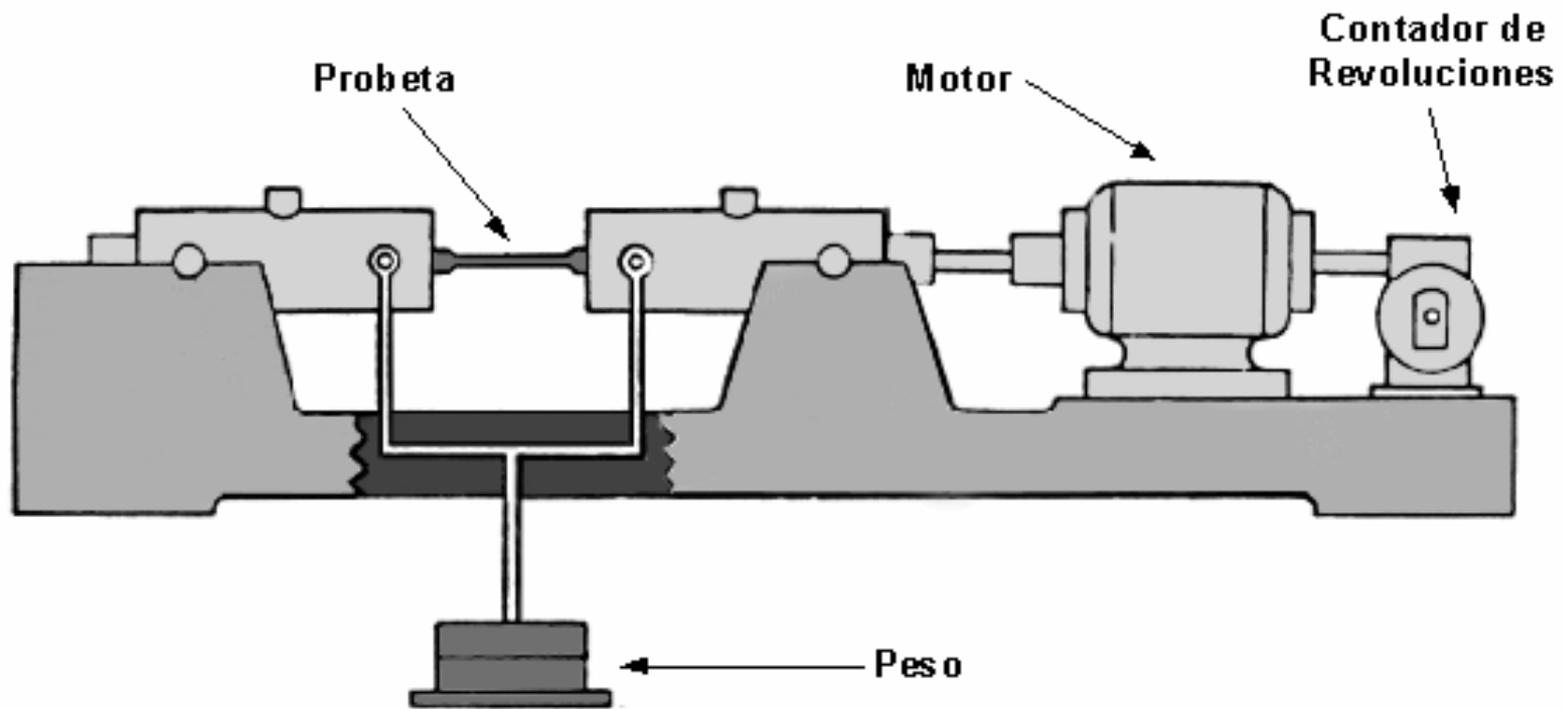
The following data were obtained for a high-strength aluminum alloy. A 0.505-in.-diameter (12.8 mm) tensile specimen with a 2-in. (50.8 mm) gage length was used. The load and gage length were obtained experimentally, whereas the stress and strain were calculated. Plot the engineering stress-strain curve.

<i>Load, lb</i>	<i>Stress, psi (MPa)</i>	<i>Gage Length, in.</i>	<i>Strain</i>
0	0	2.0000	0
4,000 $\times 5 =$	20,000 (138)	2.0041	0.002
8,000	40,000 (276)	2.0079	0.004
10,000	50,000 (345)	2.0103	0.005
12,000	60,000 (414)	2.0114	0.006
13,000	65,000 (449)	2.0142	0.007
14,000	70,000 (483)	2.0202	0.010
16,000	80,000 (552)	2.0503	0.025
16,000 (maximum)	80,000 (552)	2.0990	0.050
15,600 (fracture)	78,000 (538)	2.1340	0.067

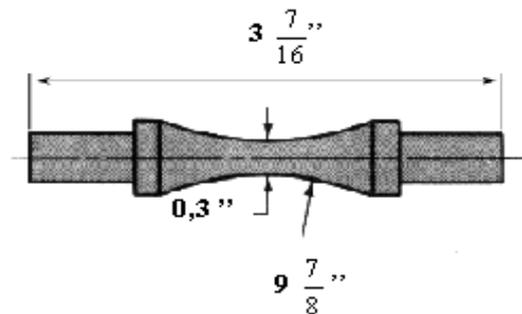
Calculate the modulus of elasticity, yield strength at 0.2% offset, percent elongation, and percent reduction of area. The diameters at maximum load and fracture are 0.485 in. (12.3 mm) and 0.468 in. (11.9 mm), respectively.



Dibujos esquemáticos de los métodos usados en la determinación de ciertas propiedades de los materiales usados en ingeniería



Máquina de Ensayo de Fatiga



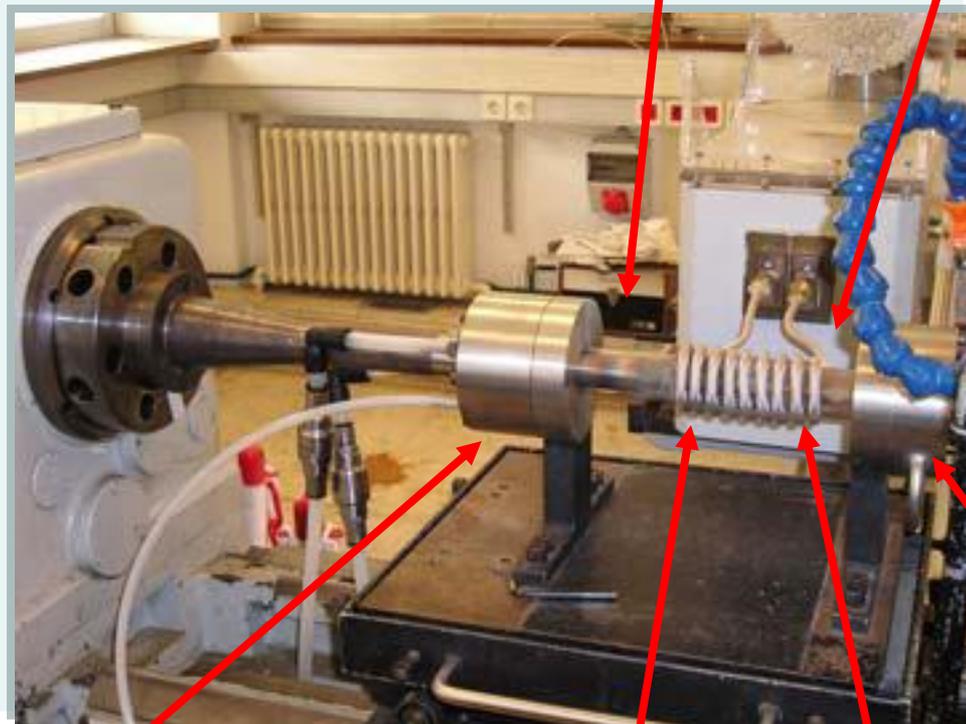
Probeta Estandarizada del Ensayo de Fatiga

El ensayo de torsión

Montaje experimental



Banco de torsión



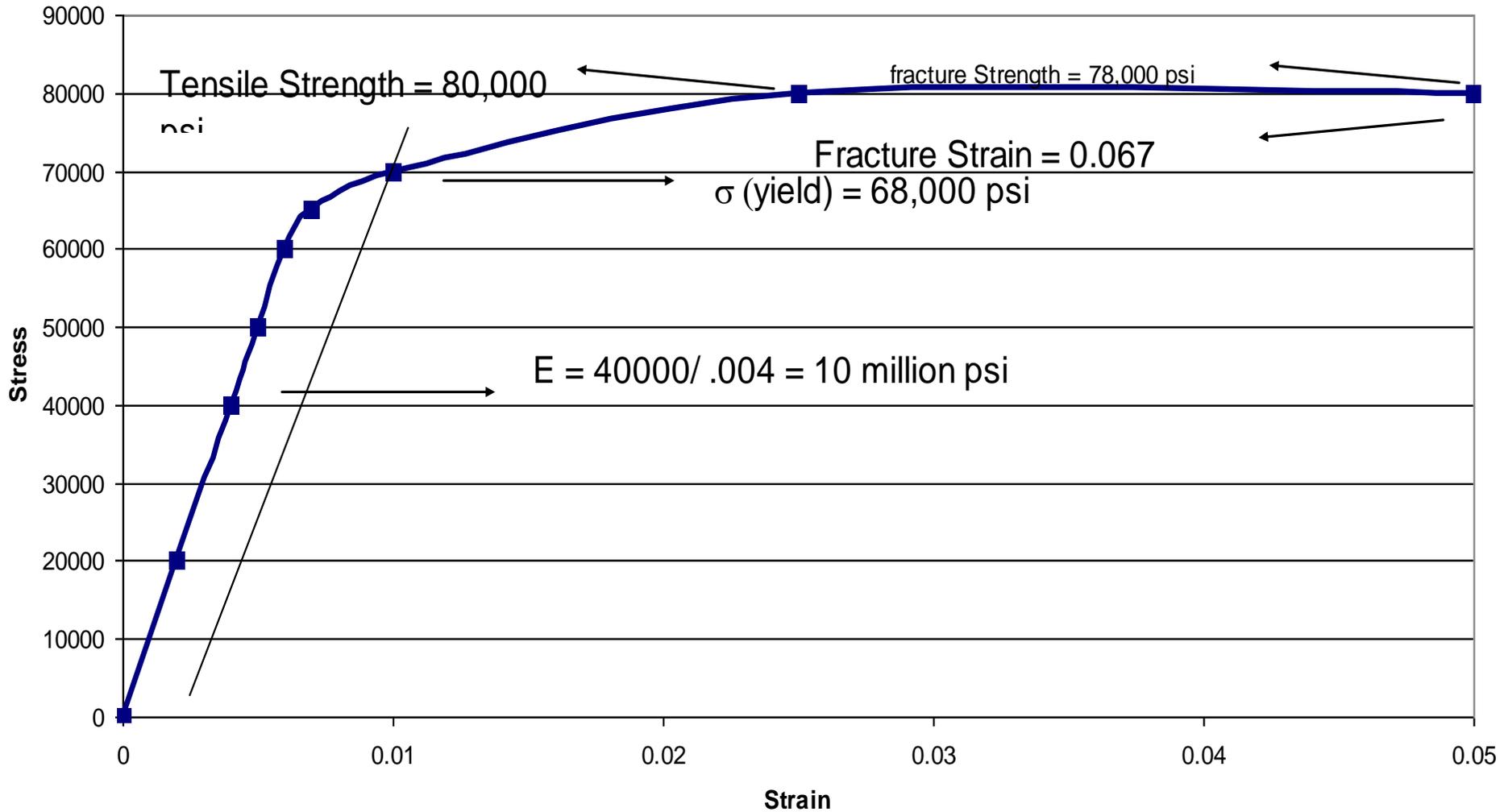
Extremo fijo

Horno de inducción

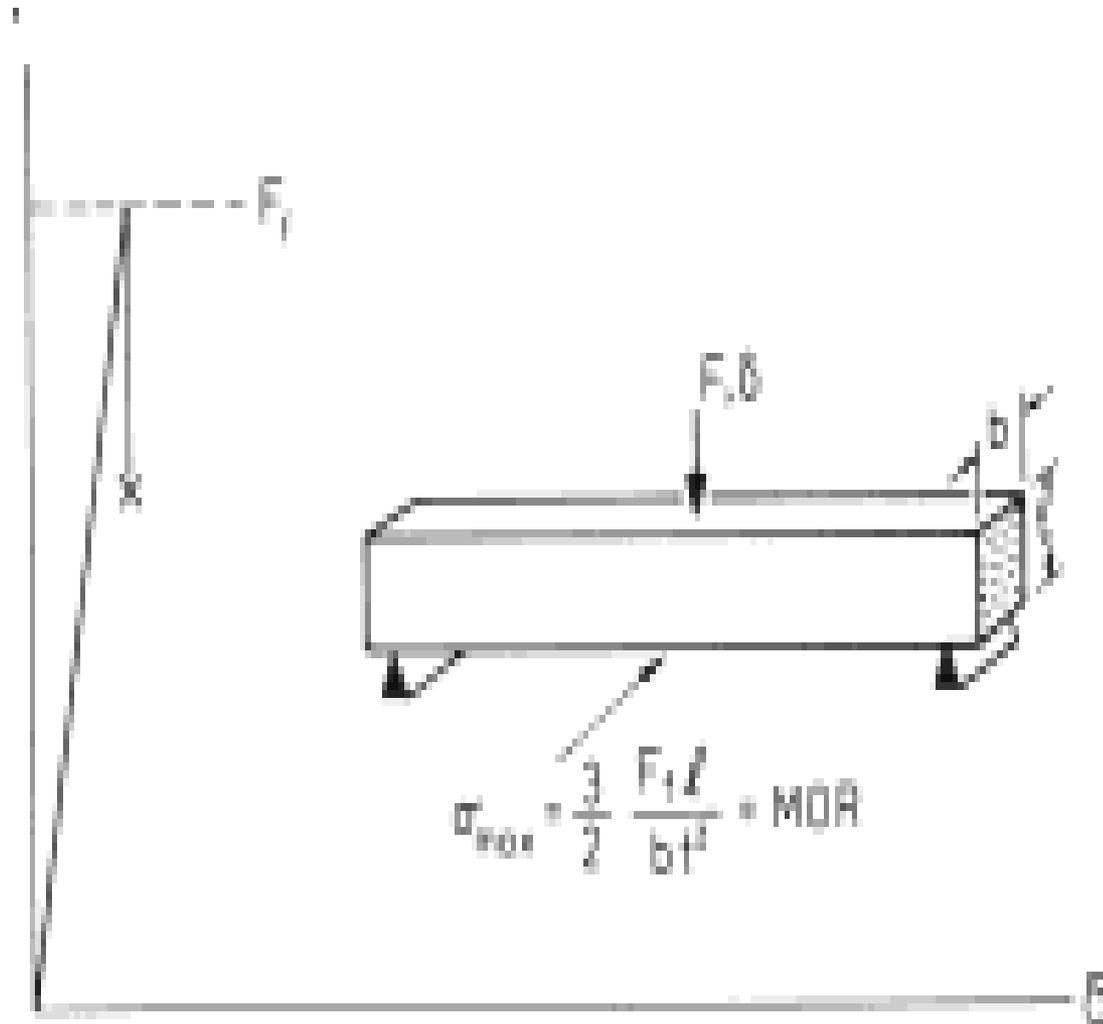
Extremo que
gira

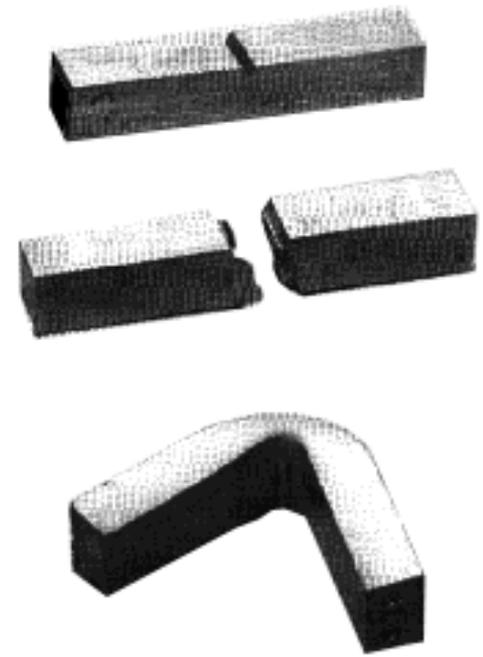
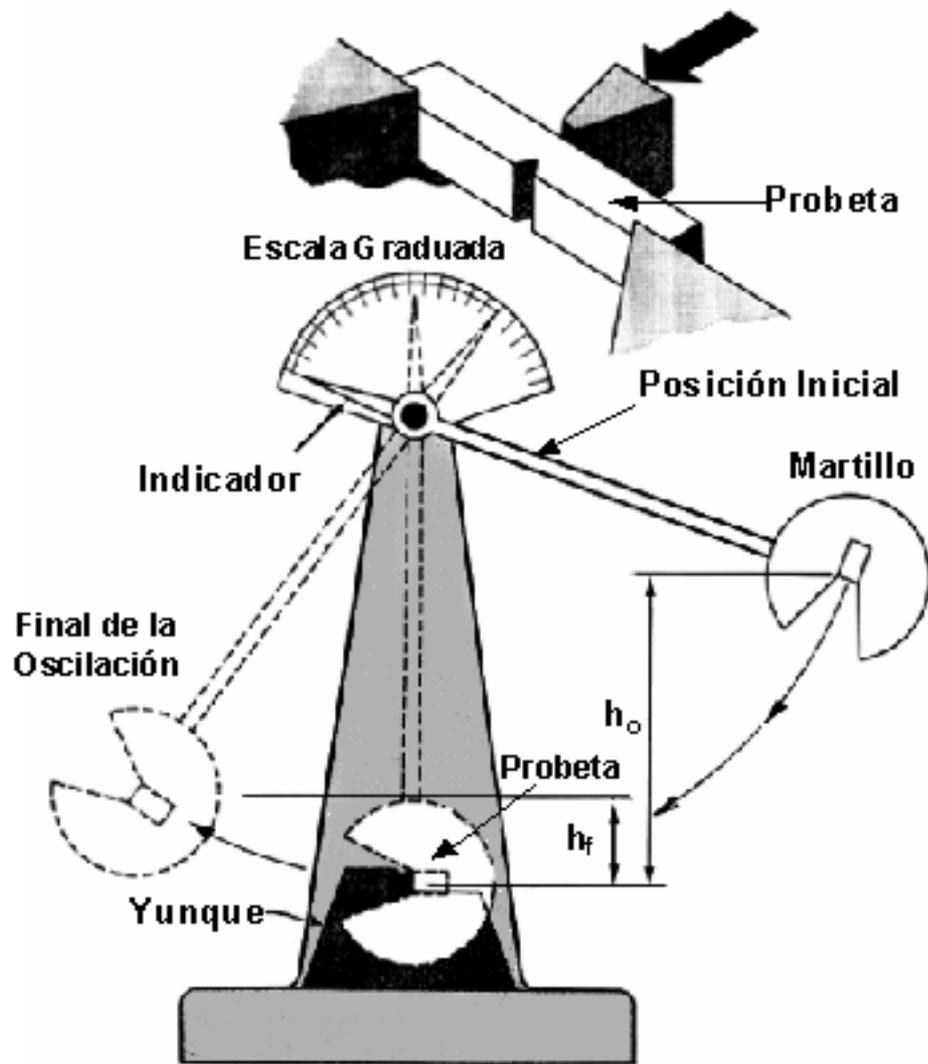
Construcción de una curva esfuerzo-deformación

Stress Strain Curve for HS Aluminum



Prueba a la ruptura de materiales frágiles



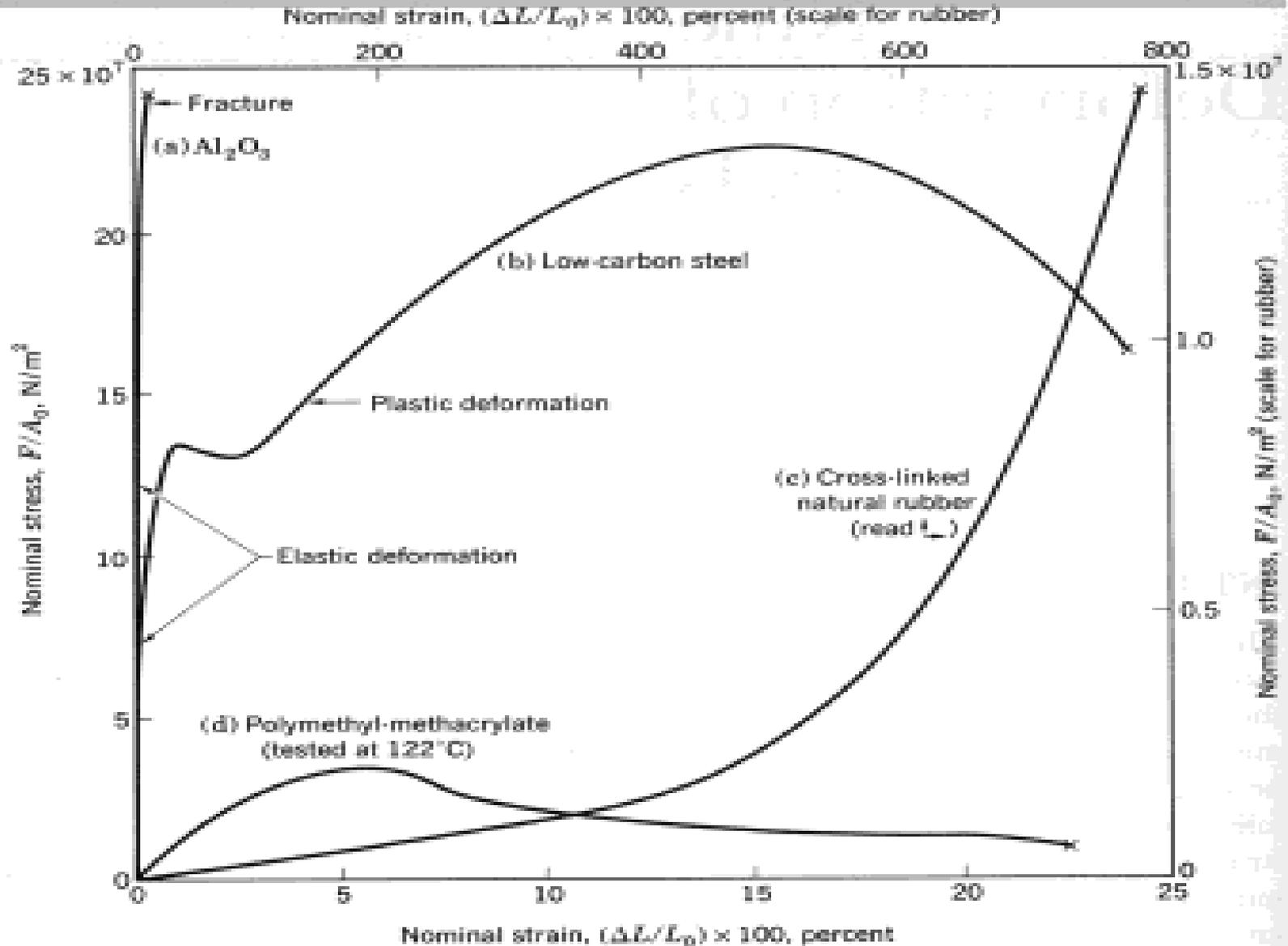


Probetas de un ensayo de impacto

Ruptura de materiales metálicos frágiles



Comparación de carga-deformación de Metales, Cerámicos, Polímeros y Elastomeros

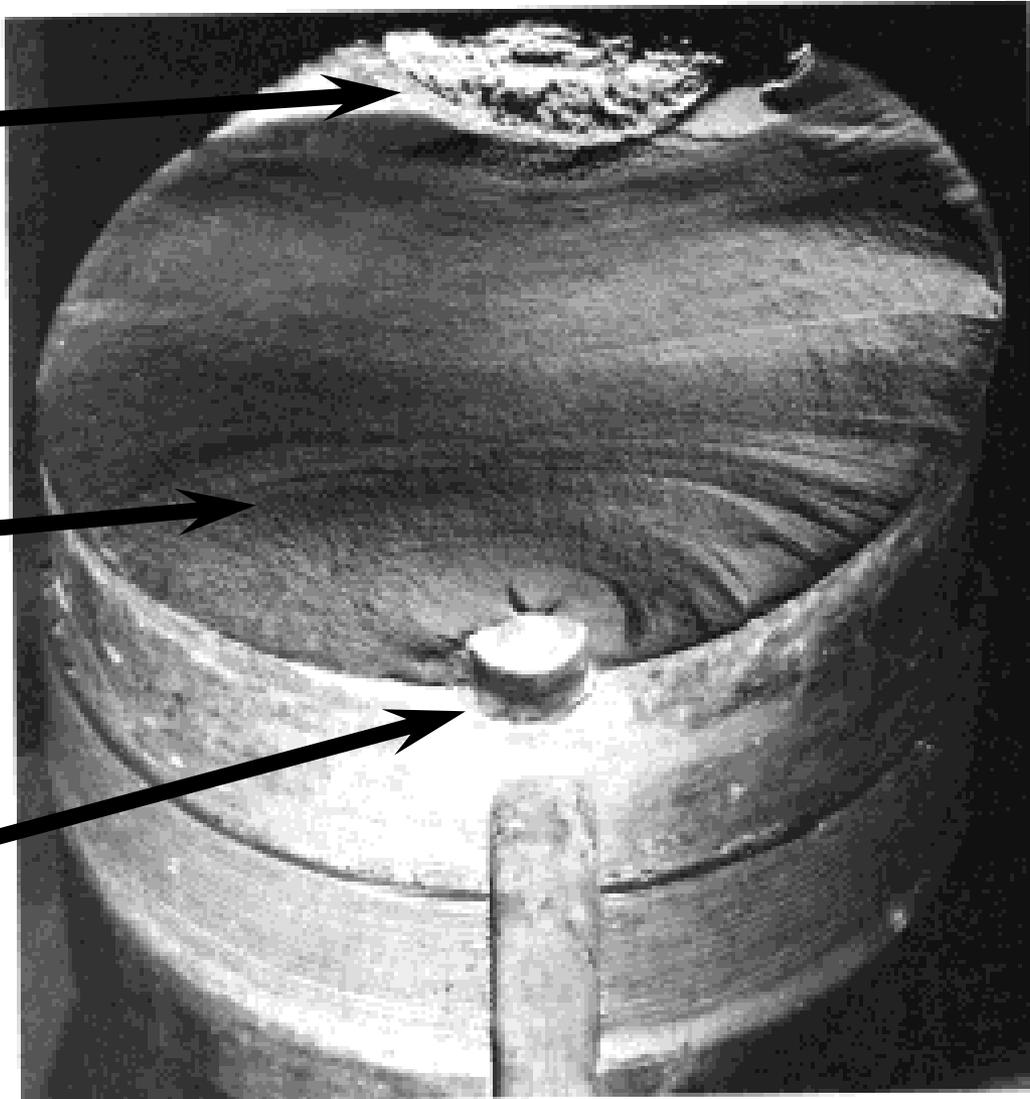


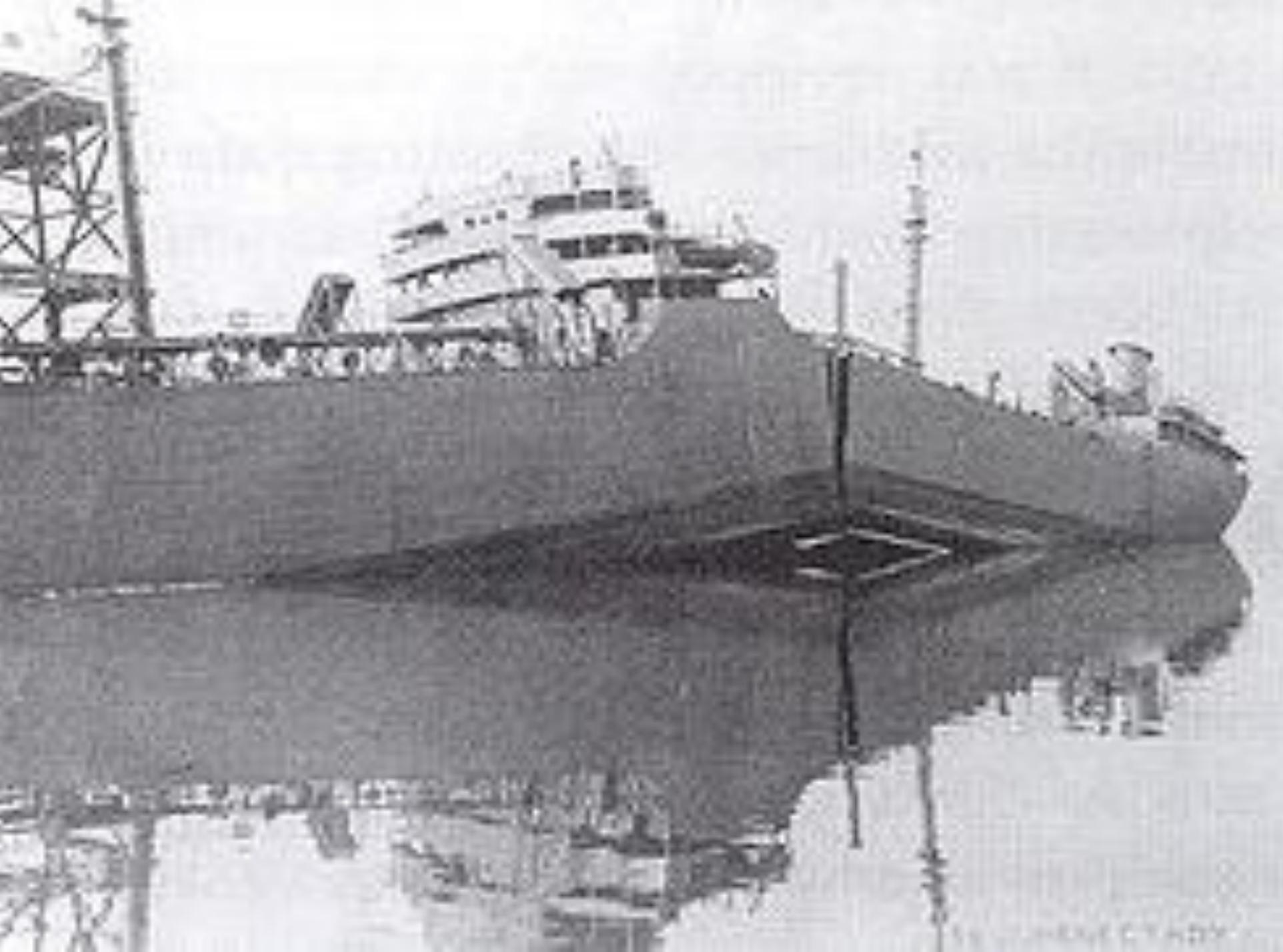
Falla por fatiga en aceros

Fast fracture

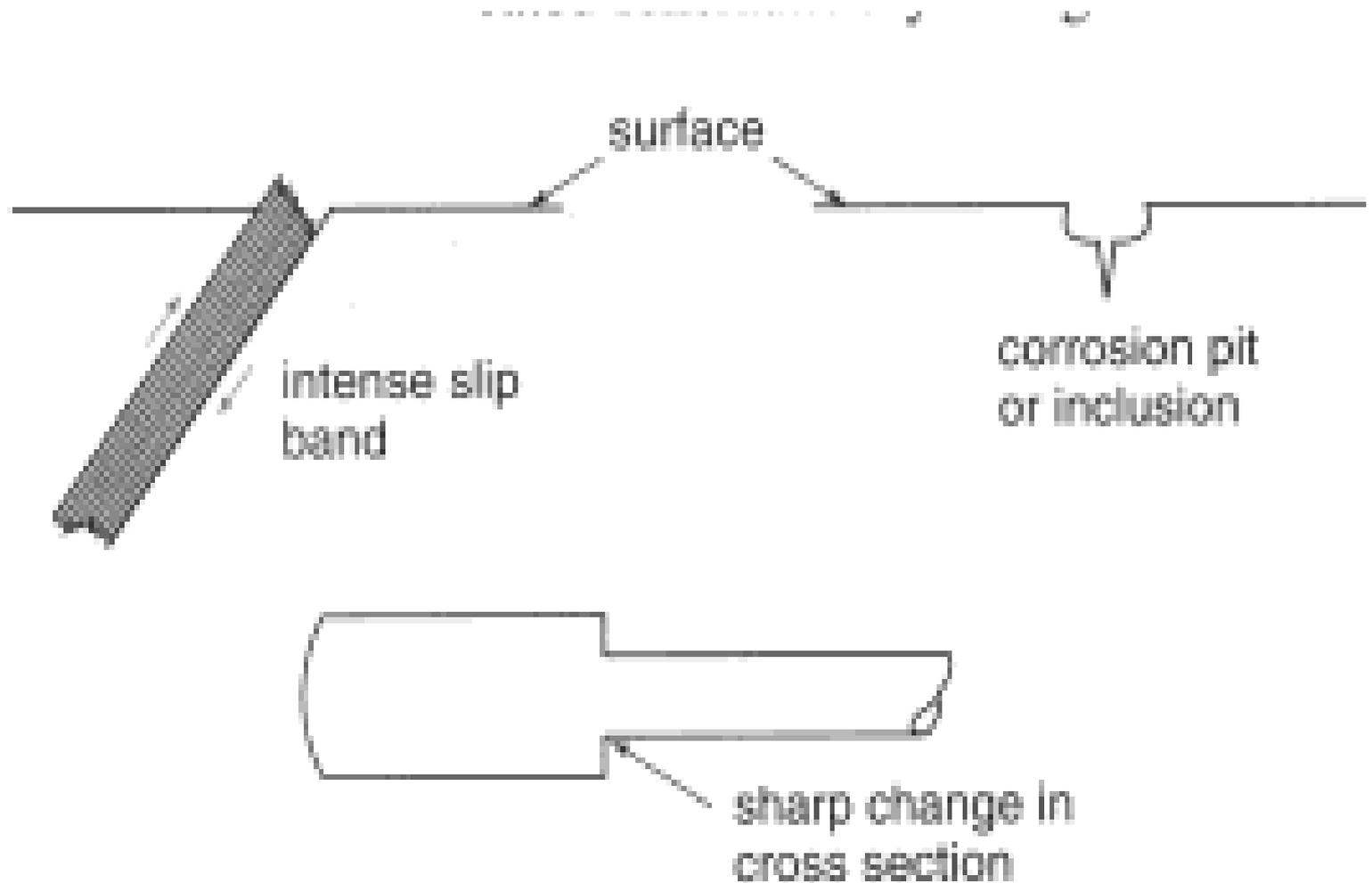
Fatigue striations

Crack origin





Origenes comunes en fractura por fatiga



Mecanismo de crecimiento de fractura por fatiga

