



CAPÍTULO 23: COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SÓLIDOS

23.1. INTRODUCCIÓN

Los metales constituyen un grupo de elementos con características bastantes singulares entre las cuales destacan las propiedades mecánicas, tales como dureza, resistencia, ductilidad, maleabilidad y tenacidad. Es conveniente luego aclarar algo el significado de estos términos fáciles de confundir por el lego. La ductilidad se refiere a la capacidad que tiene una sustancia para deformarse sin romperse cuando está sometido a tracción, por ejemplo en el estirado de un alambre.

La maleabilidad es la capacidad que presenta el material para soportar la deformación sin rotura sometido a compresión, caso de forja o laminado. Los materiales dúctiles también son maleables pero lo contrario no es cierto, ya que una sustancia maleable puede ser débil a la tracción y propensa al desgarramiento (arcilla de modelar).

Por otro lado la resistencia de un material, por ejemplo, resistencia a la tracción es la carga máxima por unidad de área que puede soportar el material.

La dureza es una propiedad que mide la mayor y menor posibilidad que tiene un material de ser penetrado por otro. Esta propiedad está directamente relacionada con la resistencia y ductilidad. Por ejemplo, el vidrio, también el fierro fundido y el acero martensítico son poco tenaces, porque sus ductilidades son casi cero aunque tienen una buena resistencia (bastantes duros). Un metal como el cobre es bastante tenaz, pues tiene una buena resistencia y buena ductilidad. Mientras que una "goma de mascar" tiene menos tenacidad ya que aunque la ductilidad es enorme su resistencia es muy baja.

Estas propiedades pueden ser medidas haciendo uso de ciertas pruebas mecánicas tales como ensayo de tracción, dureza, impacto, etc. en cuyos resultados se basa el ingeniero para el diseño de estructuras y piezas de máquinas.

23.2. ENSAYO DE TRACCIÓN

Consiste en estirar una probeta (Figura 1) de sección uniforme y conocida sometiéndola a una carga de tracción o tensión en una máquina especialmente construida para estos fines.

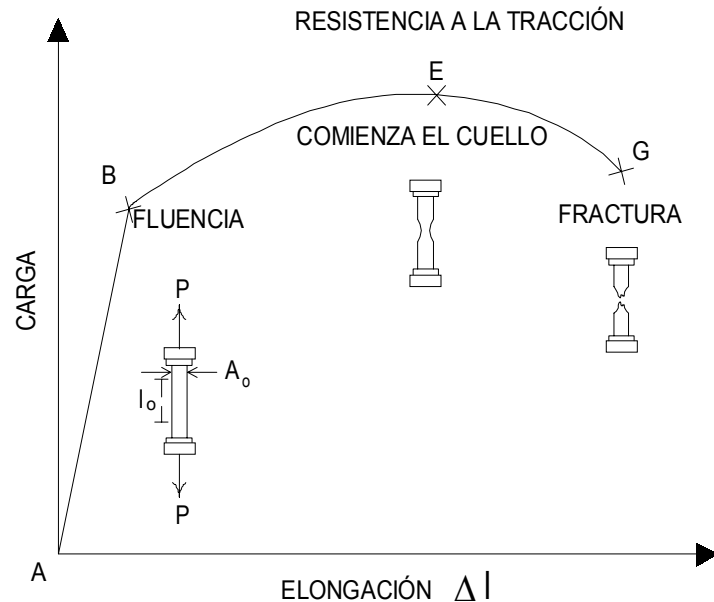


Figura 1: Curva carga-alargamiento obtenida en un ensayo de tracción

Con este instrumento se puede obtener una relación entre la carga aplicada y la deformación experimentada por la probeta tal como lo indica la figura 1. Pero para poder comparar probetas de distintas formas y tamaños conviene graficar la carga dividida por el área de la probeta versus alargamiento dividido por largo inicial o sea, esfuerzo ($\sigma = P/A_0$) versus deformación unitaria ($e = \Delta l / l_0$) tal como se ilustra en la figura 2a. Nótese que ambas curvas tienen la misma forma, lo único que hemos variado ha sido la magnitud de las unidades en los ejes de coordenadas. En ambas curvas notamos que la curva llega a un máximo, que recibe el nombre de resistencia a la tracción cuando la carga máxima se expresa por unidad de área. Otro hecho notable es que la curva se inicia como una línea recta, que significa que la deformación es directamente proporcional a la carga (o esfuerzo). Expresado matemáticamente $\sigma = Ee$, donde E es una constante del material, llamada **Módulo de Young**. Este hecho ya fue observado por **Hooke** en 1678 razón por la cual recibe el nombre de **ley de Hooke** (originalmente expresado como: "**Ut tensio, sic vis**", o sea, deformación es como la tensión). Además en este rango, si el ensayo se interrumpe y se retira la carga de la probeta, ésta vuelve a su tamaño original, o sea, la tracción es reversible en ese rango. Este comportamiento del material se denomina elástico. En los metales el límite de proporcionalidad prácticamente coincide con el límite elástico del material. Al exceder la carga del límite elástico el ensayo ya no es reversible y la probeta queda con una deformación permanente, o sea, estamos en el rango plástico. Podemos definir entonces el esfuerzo de cedencia o fluencia (Y) del material que nos indicaría el límite entre el rango elástico y el plástico. Como este punto es difícil de precisar en un ensayo, es costumbre en ingeniería definir el punto de fluencia como aquel esfuerzo con que se obtiene una deformación permanente de 0.2% ($e_p = 0.002$).

La probeta se deforma plásticamente en toda su longitud en forma uniforme al inicio y

finalmente en forma localizada, formando un "**cuello**" hasta que ocurre la ruptura (Figura 2b)

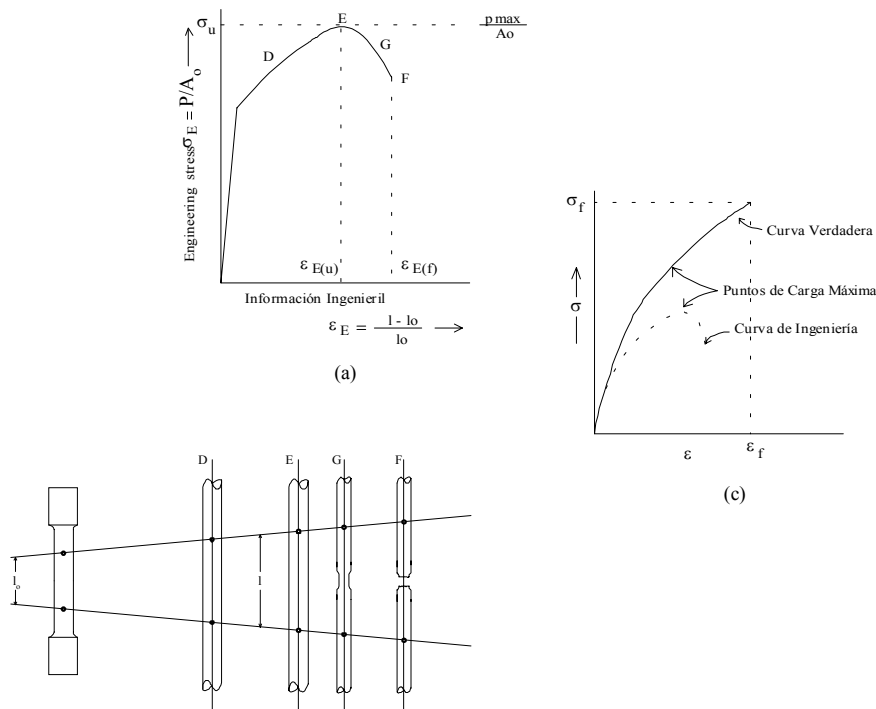


Figura 2: (a) Curva tensión-deformación ingenieril, (b) Deformación sufrida por la probeta y (c) Curvas tensión-deformación ingenieril y verdadera.

El diagrama muestra que al acercarse la probeta a su punto de ruptura la carga aplicada necesaria para producir el alargamiento disminuye. Esto naturalmente, se debe a que la sección transversal de la probeta se reduce y el esfuerzo real por unidad de área instantánea sería más bien el indicado por la línea de continua de la Figura 2c.

23.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALGUNOS METALES Y ALEACIONES

En la tabla 1 se dan algunas cifras mecánicas para algunos materiales. En ella se nota que el hierro puede aumentar su resistencia hasta 10 veces al ser aleado con el carbono y luego tratado térmicamente con lo que se endurece, pero ello trae consigo una disminución de la ductilidad. Algo semejante ocurre con el endurecimiento obtenido por deformación en frío, ilustrado por el cobre y el latón. Nótese que también puede obtenerse mejores propiedades mecánicas por aleación (compare el cobre puro con el latón).



Tabla 1: Propiedades mecánicas de algunos metales y aleaciones

	RT (UTS) (Kg/mm ²)	Y (Fluencia) (Kg/mm ²)	Ductilidad (A%)	Dureza Brinell (BHN)
Fierro recocido	20	10	40	100
Acero con tratamiento térmico	200	150	5	500
Cobre recocido	15	5	60	42
Cobre Deformado en frío	40	40	5	150
Latón 70-30 deformado en frío	85	80	5	200
Latón 70-30 recocido	35	15	40	132
Aluminio	10	5	60	15
Fierro fundido gris en 3.5%C	20	-	0	250

23.4. OTROS ENSAYOS MECÁNICOS

23.4.1. Ensayo de Dureza

Mide la resistencia de un material a ser penetrado por un indentador, herramienta de corte o simplemente rayado por otro material. El indentador usualmente es una bolita, pirámide o cono hecho de un material mucho más duro que el ensayado, por ejemplo, acero templado, carburo de tungsteno sinterizado o diamante.

Un número empírico de dureza es calculado del resultado del área o profundidad de impresión (ver tabla) y la carga aplicada. Los ensayos nunca deben hacerse cerca del borde de la probeta o más cerca que tres veces el diámetro de otra impresión.

Los ensayos de dureza producen deformación plástica en el material, luego todas las variables que afecta la deformación plástica también afectan la dureza. Para materiales que se endurecen por deformación en forma similar, hay una buena correlación entre dureza y resistencia a la tracción. Por ejemplo en aceros $BHN = 3RT$ (Kg/mm²) = $2RT$ (Kpsi).

La figura 3 recoge los tipos de penetradores e impresiones asociados con distintos ensayos de dureza.

El ensayo de dureza se hace con mucha facilidad y es un ensayo no-destructivo, razón por la cual se emplea para control de calidad en producción.

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number	
		Side View	Top View			
Brinell	10 mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$	
Vickers	Diamond pyramid			P	$VHN = 1.72 P/d_1^2$	
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = 14.2 P/l^2$	
Rockwell						
A } C } D }	Diamond cone			60 kg	$R_A =$	} 100-500t
				150 kg	$R_C =$	
				100 kg	$R_D =$	
B } F } G }	1/16 in. diameter steel sphere			100 kg	$R_B =$	} 130-500t
				60 kg	$R_F =$	
				150 kg	$R_G =$	
E	1/8 in. diameter steel sphere			100 kg	$R_E =$	
Superficial				15		
N Cono				30		
T Sphere 1/16"				45		

Figura 3: Ensayos de dureza

23.4.2. Ensayo de Impacto

Mide la energía para romper el material por una carga aplicada de golpe y está relacionada con la tenacidad del material. La fragilización que resulta de un tratamiento térmico incorrecto puede no ser revelado por el ensayo de tracción pero se hace notar con esta prueba.

La figura 4 muestra el péndulo de impacto y el aspecto y la forma de la probeta. La presencia de la muesca en la barra y la carga aplicada de golpe aumenta la severidad del ensayo. La concentración en la muesca produce fractura con muy poca fluencia plástica. Mientras más frágil la probeta, menos energía pierde el péndulo a raíz del impacto.

Los resultados de una serie de pruebas de impacto realizadas a diversas temperaturas se muestran en la figura 5. A temperaturas altas se requiere una gran absorción de energía para que se rompa la probeta. A su vez, a bajas temperaturas a probeta se

fractura con poca energía absorbida. A temperaturas elevadas el material se comporta de manera dúctil y a temperaturas bajas el material es frágil. La temperatura de transición es aquella a la cual el material cambia de presentar una fractura dúctil a una frágil. No todos los materiales presentan una temperatura de transición y ejemplo de ello son los materiales FCC.

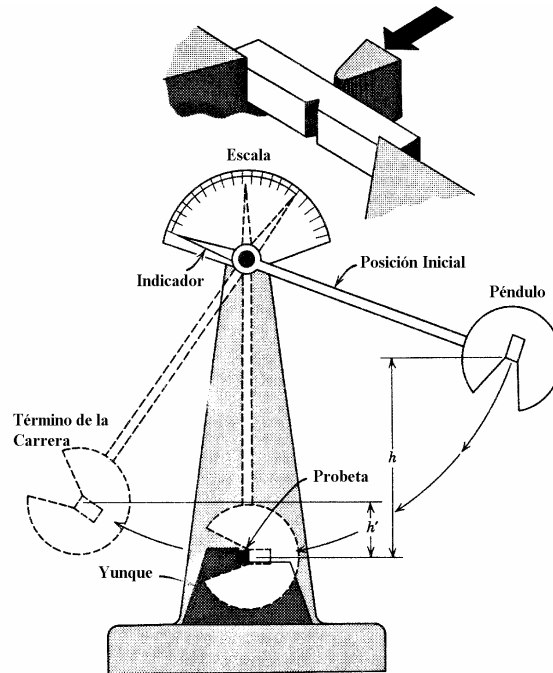


Figura 4: péndulo de impacto y aspecto y forma de la probeta

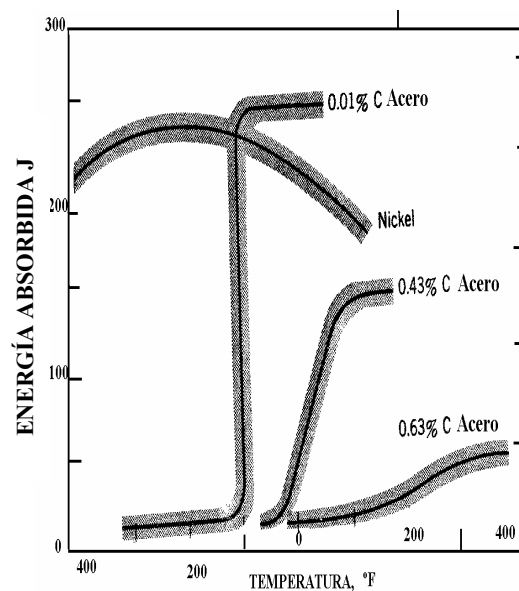


Figura 5: Variación de la energía absorbida con la temperatura para diferentes materiales.

23.4.3. Ensayo de Fatiga

Es conocido que un material no resiste altos esfuerzos durante largos períodos bajo cargas alternadas o pulsantes como ser vibraciones, que sin embargo puede resistir en forma estática. El ensayo de fatiga determina el esfuerzo que un material de dimensiones estandarizadas puede resistir por un cierto número de ciclos. La figura 6 muestra la máquina usada para el ensayo y la figura 7 los resultados en un gráfico S-N (esfuerzo versus número de ciclos). En aleaciones ferrosas existe un esfuerzo bajo el cual la probeta es casi eterna (10^8 ciclos), este valor recibe el nombre de límite de durabilidad, o límite de fatiga. Esto no ocurre en materiales no ferrosos.

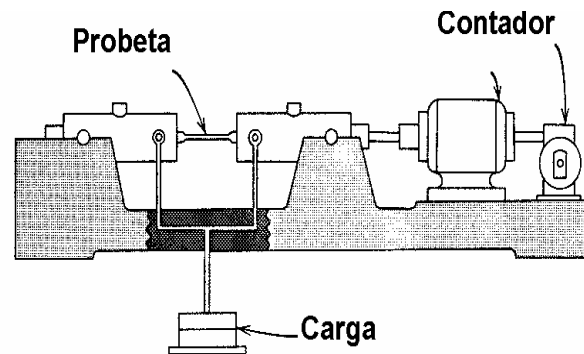


Figura 6: Máquina usada para el ensayo de fatiga.

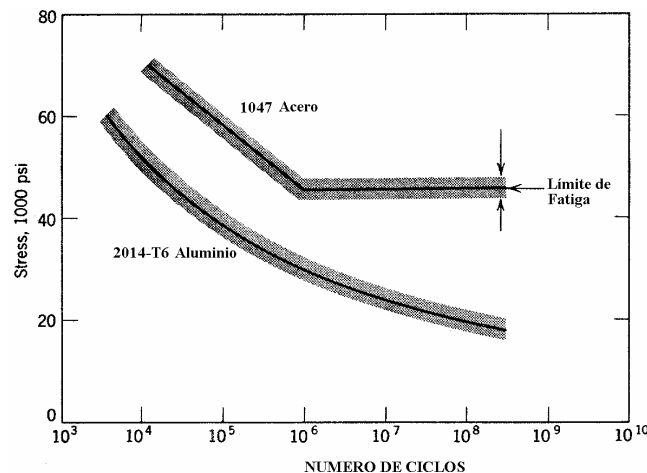


Figura 7: Gráfico esfuerzo-número de ciclos para un ensayo de fatiga.

23.5. MECANISMO ATÓMICO DE LA DEFORMACIÓN

Se ha visto que la deformación puede ser elástica o recuperable y plástica o permanente. En el primer caso tan pronto se retira la carga desaparece la distorsión (Figura 8a)

Si pensamos que un pedazo de metal está formado por átomos ubicados en perfecto orden según su estructura tenemos un modelo de esferas que las podemos considerar rígidas y el enlace entre ellas se pueden visualizar como resortes tal como lo indica la Figura 9b. Entonces la deformación elástica se puede interpretar como un estiramiento de estos resortes bajo la carga aplicada.

Ahora si el esfuerzo excede el límite elástico, esto significa que los resortes se estiraron hasta cortarse, deslizando entonces una capa de átomos por encima de la otra y luego estos resortes se resuedan una posición atómica más adelante, con lo cual la red atómica se rehace y el único cambio que se observa, es en la superficie del metal, en la cual se nota el desplazamiento permanente (Figura 8b y 10).

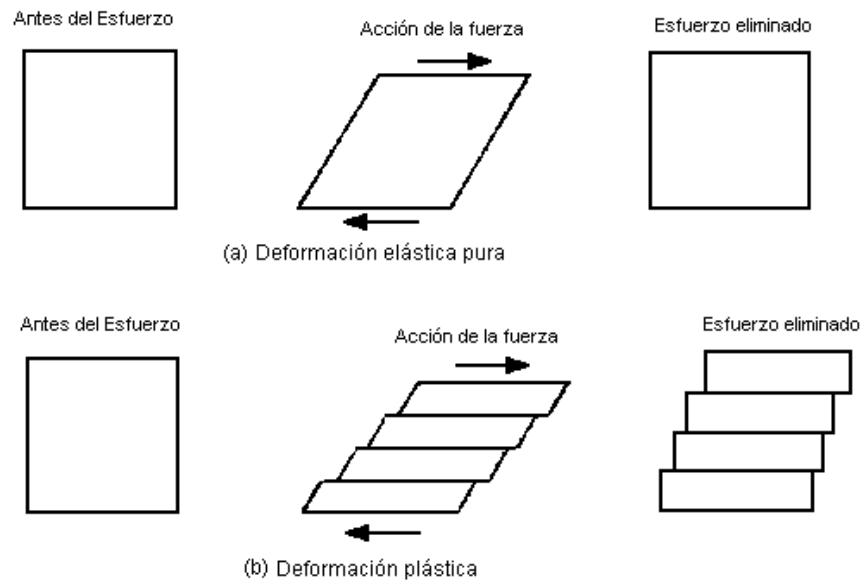


Figura 8: Deformación elástica y deformación plástica

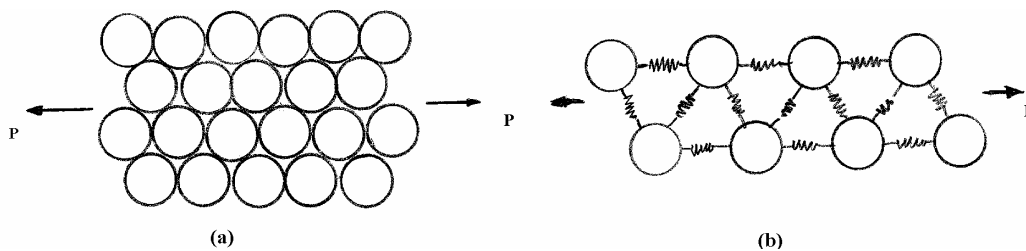


Figura 9: Modelo de esferas rígidas

Esto significa que la deformación plástica consiste en un deslizamiento de planos de átomos (como en un mazo de naipes).

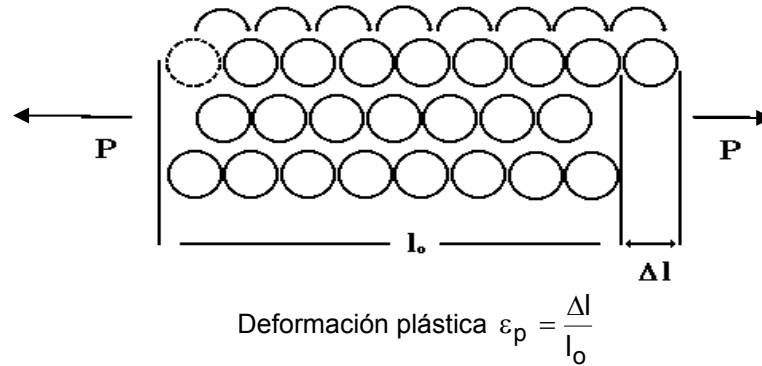


Figura 10: Esquema del deslizamiento que se produce en la deformación plástica.

Este deslizamiento es de tal naturaleza que el metal mantiene la misma estructura cristalina (por ejemplo la estructura FCC del cobre permanece FCC después de desplazarse las capas de átomos con la deformación plástica); sólo se notan líneas de deslizamiento o escalones en la superficie de la probeta figura 11 y figura 12 para la tracción en un mono cristal de cinc con estructura hexagonal compacta de un solo plano de deslizamiento.



Figura 11: Líneas de deslizamiento

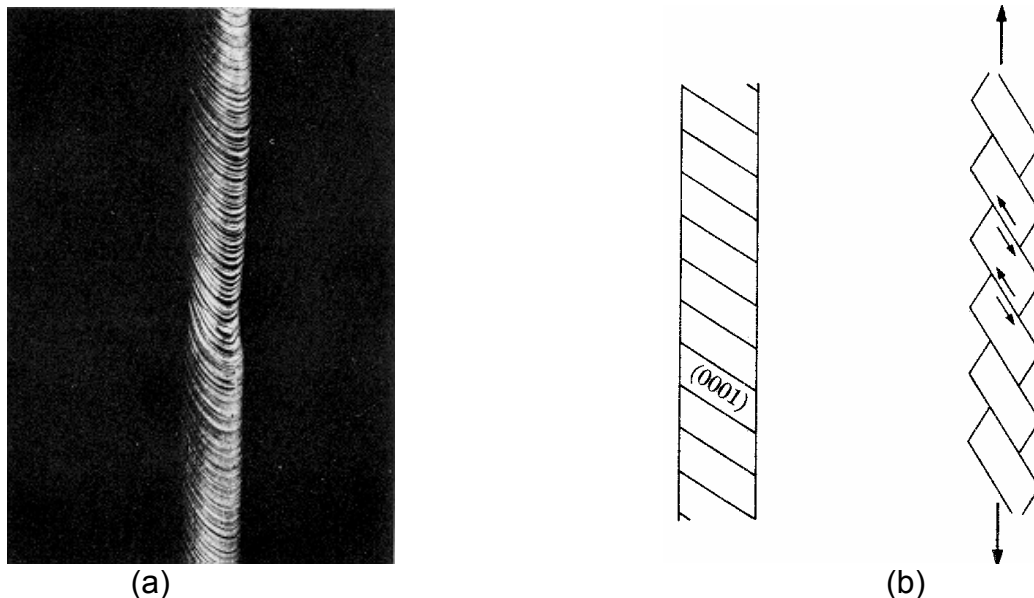


Figura 12: Mono cristal de cinc deformado plásticamente mostrando las bandas de deslizamiento: (a) vista frontal de un cristal real y (b) vista esquemática indicando los planos de deslizamiento basales HCP en el cristal.

En una probeta metalográfica pulida previamente a la deformación se pueden observar también las líneas de deslizamiento o escalones ($\Delta l = 1000$ ó más diámetros atómicos) indicados en la figura 13. En cada grano hay líneas paralelas entre sí que indican la naturaleza geométrica o cristalográfica del deslizamiento y cómo los granos tienen distinta orientación cristalográfica entre ellos; las líneas de deslizamiento también tienen diferente orientación entre grano y grano en un metal real policristalino.

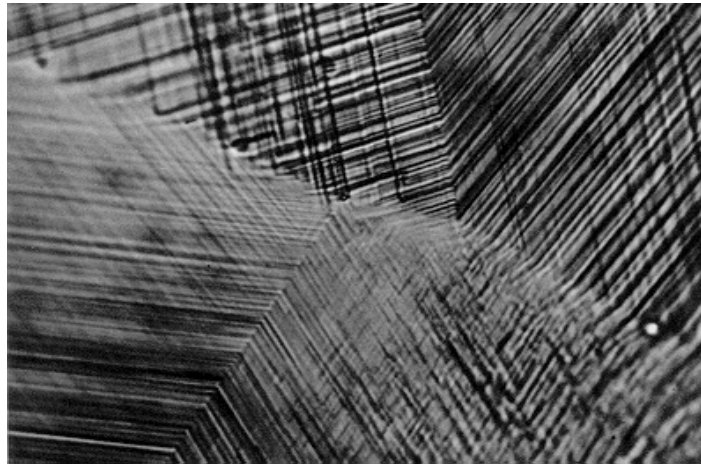


Figura 13: Líneas de deslizamiento y escalones observados en la superficie de una muestra preparada metalográficamente.

Estudiando probetas metálicas monocristalinas se ha determinado experimentalmente que los planos de deslizamiento en los metales son los planos más compactos. Del mismo experimento se puede determinar el esfuerzo necesario para iniciar el deslizamiento en los planos, este es el esfuerzo crítico que da lugar al esfuerzo de fluencia en el ensayo de tracción. Es obvio que cada cristal requiere de un esfuerzo de tracción de acuerdo a su orientación para alcanzar ese esfuerzo crítico. Esta es la razón por la cual el límite de fluencia en una probeta policristalina, que es el material que normalmente usamos, no se presenta en un punto totalmente definido sino que se inicia en unos cristales antes que en otros dependiendo de su orientación cristalina, razón por la cual se define arbitrariamente el límite de fluencia en el punto en que la deformación permanente es de 0.2%. Pero aquí debe quedar claro entonces que aunque el esfuerzo a que se ha sometido un material no alcance la fluencia general ($e_p = 0.2\%$) hay ya una serie de granos que se han formado plásticamente, aquellos orientados favorablemente.

La teoría simple de deformación plástica de monocristales desarrollada a comienzos de siglo expuesta hasta aquí permite explicar un sinnúmero de fenómenos pero deja sin adecuada explicación dos hechos, a saber:

- Los metales se endurecen por deformación, o sea, se requiere un esfuerzo cada vez mayor para seguir deformando plásticamente el metal.

- Hay una discrepancia de más de 100.000 veces entre los cálculos teóricos del esfuerzo necesario para hacer deslizar los planos atómicos y el esfuerzo medido experimentalmente en metales reales.

Sólo en 1935 se encontró una teoría adecuada, que ya está confirmada experimentalmente con el uso del microscopio electrónico, que mostró que los cristales contienen defectos, llamados DISLOCACIONES, que al desplazarse en los cristales permiten deslizar los planos cristalinos a esfuerzos mucho menores. También estos defectos se multiplican durante el proceso de deformación plástica y empiezan a interactuar, estorbarse y entorpecer el deslizamiento con el cual se hace más difícil proseguir la deformación plástica, o sea, el metal se endurece.

La figura 14a muestra un cristal con una dislocación, o sea, es una configuración atómica en que le sobra o falta la mitad de un plano atómico vertical.

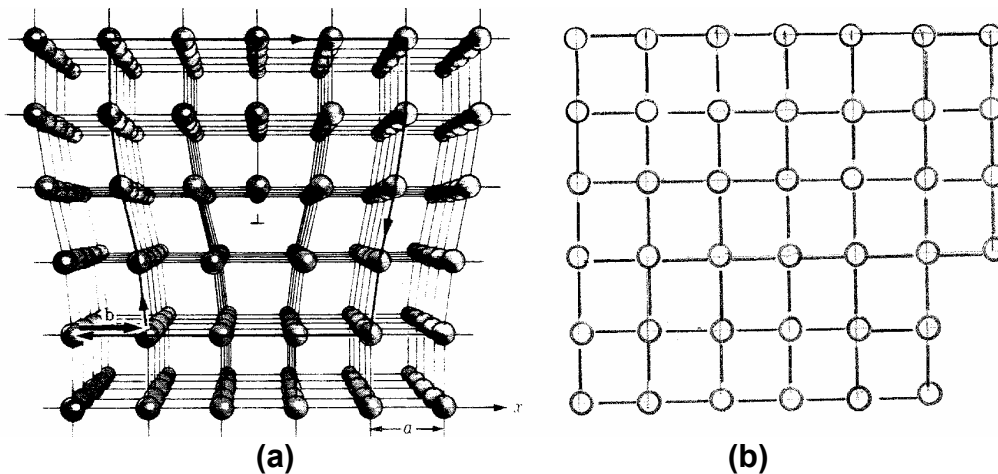


Figura 14: Ilustración esquemática de como una dislocación produce un escalón.

La Figura 14b, indica que se produce un escalón en la superficie al pasar la dislocación a través del cristal. Obviamente para producir un escalón visible con el microscopio óptico metalográfico es necesario que miles de dislocaciones deslicen dentro del cristal.

Para obtener metales de gran resistencia o dureza hay dos posibilidades, obtener cristales sin defectos tales como dislocaciones, o sea cristales perfectos, o tratar de inmovilizar las dislocaciones.

Lamentablemente hasta ahora ha sido sólo posible obtener cristales perfectos de tamaño minúsculo que reciben el nombre de "whiskers" (barbas) y que tienen resistencia cercana a la teórica. La segunda alternativa es entonces más factible y ha sido utilizada ampliamente en metalurgia para obtener metales de cada vez mayor resistencia.

Los modos usados para interferir con el movimiento de dislocaciones son:

- Aumentar el número de dislocaciones (endurecimiento por deformación en frío)
- Por aleación de átomos de mayor o menor tamaño que deforman la red metálica haciendo más difícil el paso de las dislocaciones. Vean ejemplos para aleaciones de cobre en la tabla 1.
- Usar material policristalino de pequeño grano (gran cantidad de bordes de grano donde las dislocaciones tienen que cambiar de plano de deslizamiento porque los granos tienen distinta orientación cristalográfica).
- Interacción de dislocaciones con precipitados duros (carburos en los aceros).

23.6. FRACTURA DE METALES

Si un metal se endurece efectivamente podemos lograr que se requieran esfuerzos tan grandes para mover las dislocaciones, que prácticamente sea imposible el deslizamiento de planos atómicos (pierde toda ductilidad) y se llega a vencer el esfuerzo de cohesión entre los átomos (Figura 15), con lo cual el metal llegaría a romperse en dos partes o sea **FRACTURARSE** frágilmente como si fuera vidrio. Esa es también la razón porque el metal se fractura después de endurecerlo mucho por deformación.

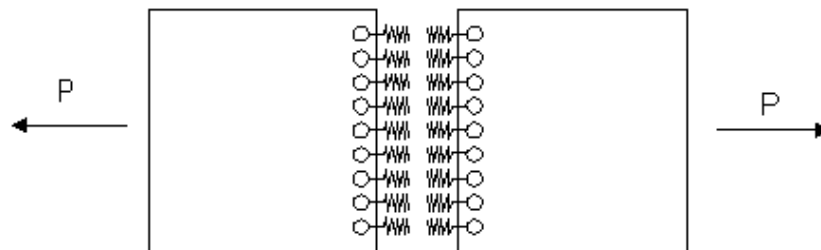


Figura 15: Fractura frágil o decohesión de los enlaces atómicos

Vemos entonces que una pieza parte de una máquina, además de poder fallar por exceso de deformación elástica o de deformación plástica puede también fallar en forma sorpresiva por fractura frágil. Esta característica de la fractura frágil de ocurrir sin aviso es la que la hace responsable de grandes catástrofes que involucran enormes pérdidas materiales y no pocas veces también vidas humanas. En la Figura 16 se presenta esquemáticamente diferentes tipos de fracturas:

Por ejemplo, el caso a) sería el comportamiento de un material como la plastilina, mientras que el caso b) representaría el vidrio o un material cerámico o refractario y el caso c) sería el comportamiento del metal dúctil. En los tres casos, σ_f representa el esfuerzo de fractura.

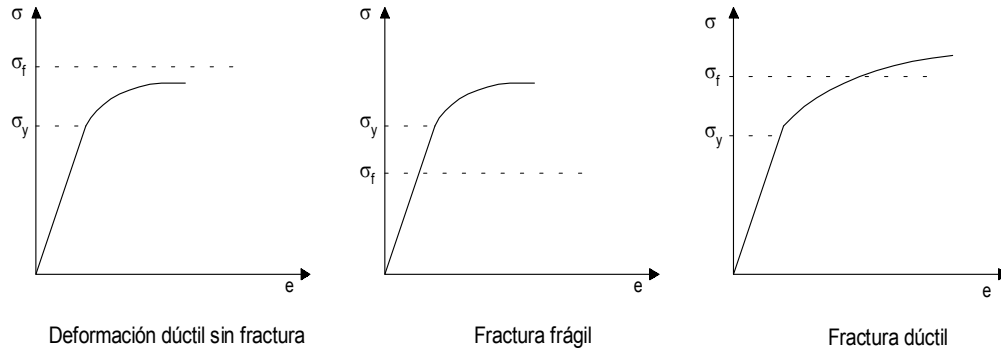


Figura 16: Representación esquemática de diferentes tipos de fracturas

Al someter a esfuerzos el metal se deforma primero elásticamente y luego plásticamente y se produce el endurecimiento por deformación hasta un punto tal que los enlaces llegan a estar sometidos al esfuerzo de fractura, esta fractura es dúctil ya que ocurre después de cierta deformación plástica notoria a simple vista. Sucede que algunos materiales ordinariamente dúctiles llegan a ser frágiles después de un tratamiento térmico inadecuado, o si se usa el acero a baja temperatura, o el cobre “tough-pitch” si es usado en atmósfera reductora (rica en hidrógeno), o grandes estructuras soldadas sin el debido cuidado.

Un ejemplo dramático es la historia de los famosos barcos "Liberty" de los cuales E.E.U.U. construyó 2700 en tres años durante la 2ª Guerra Mundial, lo que equivale a 2,5 barcos por día. Para producir a tal ritmo tuvieron que prescindir completamente de los métodos tradicionales. En particular se abandonó la construcción remachada sustituyéndola por estructuras soldadas. Ya en 1943 dos navíos se partieron en dos. En 1945 más cuatrocientos barcos estaban agrietados sin haber participado en la guerra. Estas fallas catastróficas se debieron a una serie de factores como inexperiencia en soldadura de grandes estructuras, uso de aceros inadecuados para soldadura terminando en fractura frágil después de agrietamiento por fatiga.

23.7. ENDURECIMIENTO POR TRABAJO EN FRÍO Y RECOCIDO

Un metal trabajado en frío se encuentra en un estado de deformación considerable, lleno de defectos tales como dislocaciones entrabadas entre sí. Si el metal se calienta a una temperatura suficientemente elevada estos defectos se eliminan y al mismo tiempo la resistencia a la tracción y la dureza del metal se reducen aproximadamente a su valor original y la capacidad para el trabajo en frío se recupera. Esta forma de tratamiento térmico se conoce como recocido.

Para cuantificar la cantidad de trabajo en frío de un metal se define la acritud que no es más que el porcentaje de reducción de área del material.

$$\text{Acritud} = \frac{A_i - A_f}{A_i} \cdot 100$$

en que A_i y A_f son las áreas inicial y final de una probeta respectivamente, tras ser ésta sometida a deformación. La figura 17 es un gráfico que indica cómo varían algunas propiedades del metal con la temperatura de recocido.

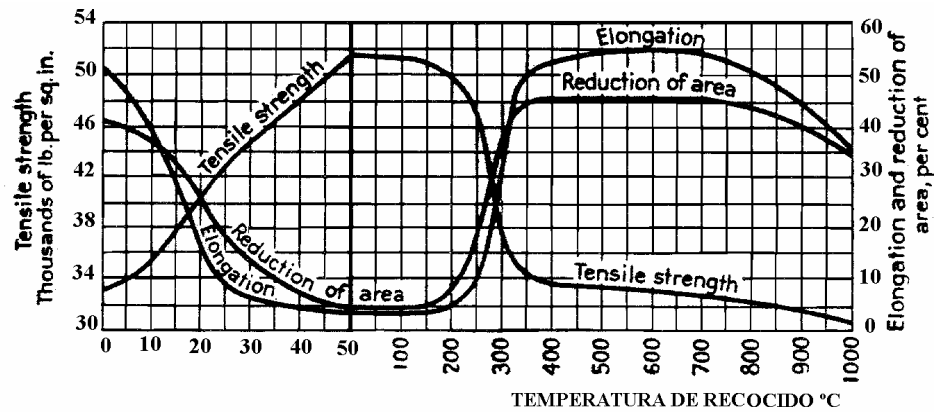


Figura 17: Efecto de la temperatura de recocido sobre algunas propiedades mecánicas de un metal.

Para eliminar tensiones basta con calentar a bajas temperaturas por ejemplo el latón 70-30 a 200°C, ya que es necesario permitir que los átomos se desplacen sólo un poco. Estos pequeños movimientos reducen las tensiones sin producir alteración visible en los cristales distorsionados. A mayor temperatura se observa rápidamente que en la estructura deformada comienzan a formarse nuevos cristales a partir de centros de nucleación (Figura 18 y 19).

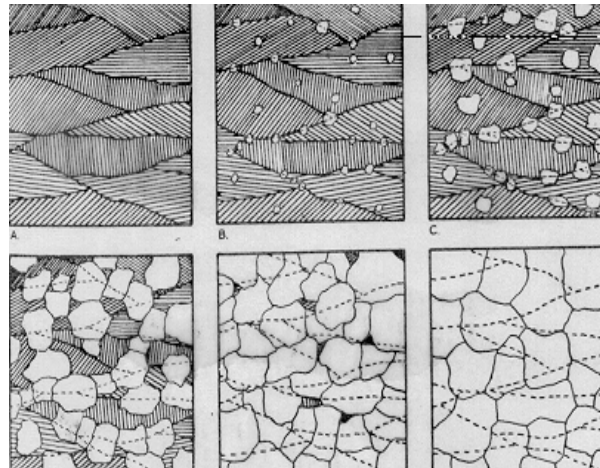


Figura 18: Etapas en la recristalización de un metal.

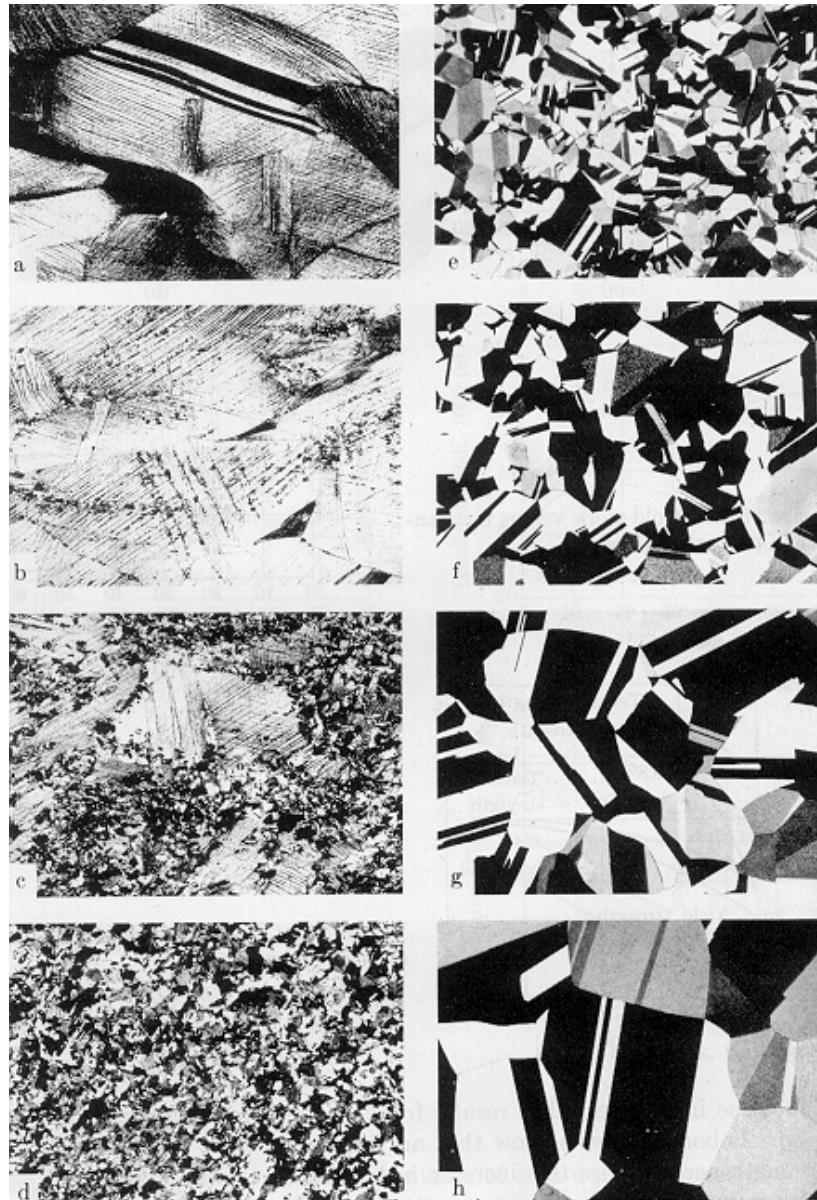


Figura 19: Etapas de la recristalización

Los cristales así formados, al principio pequeños, crecen gradualmente hasta que absorben toda la estructura distorsionada producida originalmente por el trabajado en frío. Los nuevos cristales están casi exentos de dislocaciones. Este fenómeno se conoce como recristalización y es el método principal empleado en combinación con el trabajo en frío para producir una estructura de grano fino en metales y aleaciones no ferrosas. Sólo en raros casos como el acero es posible refinar el tamaño del grano por sólo tratamiento térmico (por tener un cambio de estructura cristalina).

La temperatura mínima a la cual ocurre la recristalización en algunas horas recibe el nombre de "temperatura de recristalización". Esta temperatura depende de la pureza

del metal, del punto de fusión y de la acritud del metal (Figura 20).

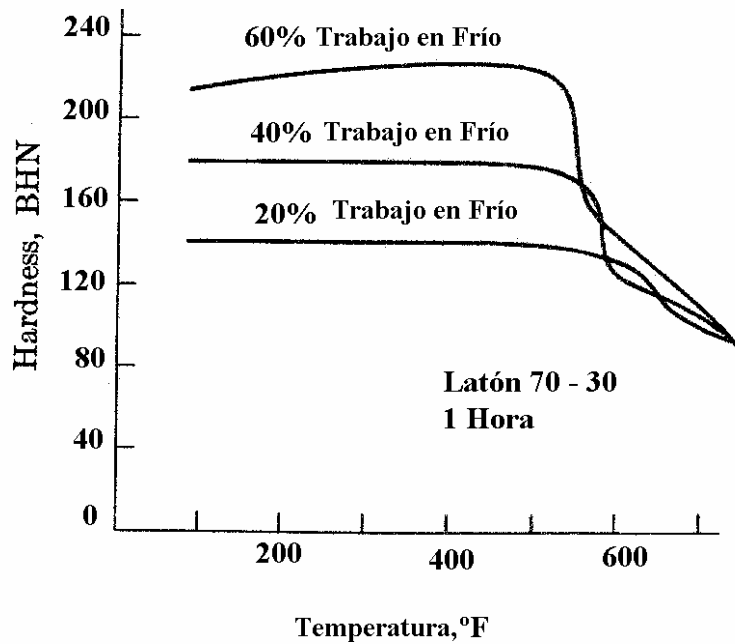


Figura 20: Variación de la temperatura de recristalización con el porcentaje de deformación en frío.

Por ejemplo mientras más puro el metal, menor es su temperatura de recristalización. También a mayor acritud menor temperatura de recristalización. Como la recristalización es esencialmente un reordenamiento paulatino de los átomos desde una estructura distorsionada, esto implica que los átomos deben moverse y reubicarse en la red cristalográfica del metal, o sea deben deshacer y rehacer su enlace con los átomos vecinos. Como la temperatura de fusión del metal es una medida aproximada de la resistencia del enlace atómico no es de extrañarse que la temperatura de recristalización esté relacionada con la primera. Una relación simple usada como primera aproximación es que la temperatura de recristalización T_r es la mitad de la temperatura de fusión expresada en grados absolutos. (Figura 21)

$$T_r = \frac{1}{2} T_f (K)$$

$$t_K = t_C + 273$$

Esto explicaría por qué el deformar plomo a temperatura ambiente sería una operación de trabajo en caliente mientras que deformar tungsteno al rojo vivo a 800°C seguiría aún siendo un trabajo en frío.

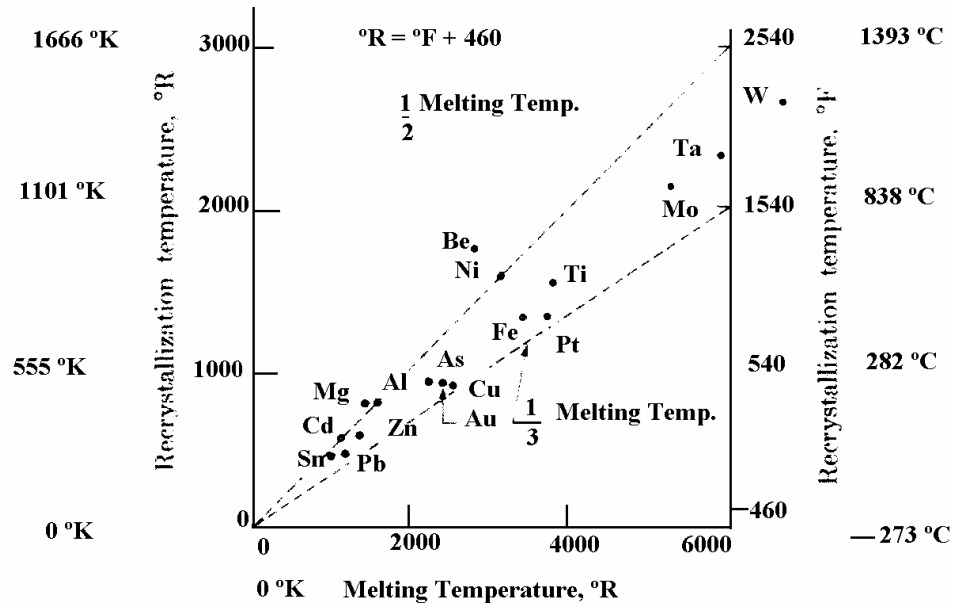


Figura 21: Relación entre la temperatura de recristalización y la temperatura de fusión para distintos metales.

23.8. CRECIMIENTO DE GRANO

Luego de haber terminado la recristalización y si se mantiene el metal o aleación por más tiempo a esa temperatura ocurre el fenómeno de crecimiento de grano. Esto consiste en que los granos más grandes absorben a los más pequeños con lo cual el tamaño de grano promedio resulta más grande. Como este proceso requiere del desplazamiento de átomos por difusión de un grano a otro a través del borde de grano, esto ocurre más rápidamente mientras más alta sea la temperatura. (Figura 19 e, f, g y h).

La tabla 2 muestra el tamaño de grano según ASTM $N = 2^{n-1}$.

N	N granos/pulg ² a 100 x	Diámetro grano en mm
1	1	0.25
2	2	0.18
3	4	0.125
4	8	0.091
5	18	0.061
6	32	0.044
7	64	0.032
8	128	0.022