

---

# 2. Características Generales de los Materiales

---

A lo largo de una jornada típica de nuestra vida recurrimos a diversos utensilios: nos levantamos y nos peinamos con un **peine de plástico**; calentamos el agua para el café en una **pava metálica**; tomamos el café en una **taza cerámica** mientras miramos el jardín a través de los **vidrios de la ventana**. Consultamos nuestra **agenda de papel** y salimos de casa cerrando cuidadosamente la **puerta de madera**. ¿Se pusieron a pensar por qué el peine es de plástico y no de vidrio; por qué la pava es de acero y no de plástico; y por qué la taza es de cerámica y no de madera?

Las diversas propiedades de superficie y de volumen de un material tienen influencia directa sobre sus características. Es por ese motivo que dichas propiedades deben ser conocidas previamente a cualquier aplicación que se le dé a los materiales, como así también debe conocerse cualquier posible cambio que puedan sufrir a lo largo del tiempo una vez que estén en servicio. La información relacionada con las propiedades básicas de los materiales se puede encontrar en diversos manuales y tablas; sin embargo, esta información debe ser evaluada en el contexto del uso particular que se les va a dar. A continuación se hará mención a las propiedades básicas que deben conocerse de los materiales, de cómo éstas son determinadas experimentalmente, y de la manera en que ellas determinan la factibilidad del uso de determinado material.

---

## □ 2.1 Introducción al estado sólido

---

Los sólidos se diferencian de otros estados de la materia (líquido y gaseoso) por el hecho de que sus átomos se mantienen unidos entre sí por fuerzas interatómicas fuertes (enlaces). Como consecuencia de ello, casi todas las propiedades de un sólido dependerán de la naturaleza y fuerza de estos enlaces interatómicos.

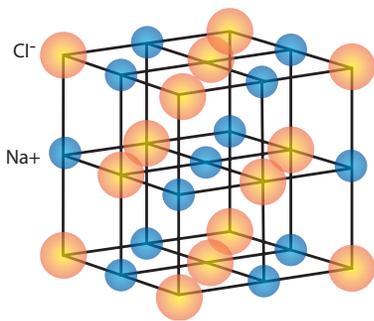
Un enlace es la unión entre los átomos de un compuesto. Esta unión se produce como consecuencia de la estructura electrónica de los mismos. En efecto, la actividad química de los elementos radica en su tendencia a adquirir, mediante su unión con otros átomos, la configuración de los gases nobles (ocho electrones en la capa más externa, salvo el helio, que sólo tiene dos), que es una configuración extremadamente estable.

Aunque dichos enlaces tienen propiedades bien definidas, la clasificación no es rigurosa ya que existe una transición gradual de uno a otro que permite considerar tipos de enlaces intermedios.

Generalmente, se consideran tres tipos principales de enlaces químicos: iónico, covalente y metálico.

Por ejemplo, la sal común está formada por un no metal, el cloro, y un metal alcalino, el sodio. En estado puro, ambos son extremadamente peligrosos para el hombre; sin embargo, juntos forman una sustancia que es inocua en pequeñas cantidades. Se dice, por tanto, que han formado un nuevo compuesto químico, el cloruro de sodio, sustancia muy diferente de los elementos que la componen. Muchas de las sustancias que conocemos están formadas por uniones de distintos elementos.

1. **IÓNICO:** en este enlace iónico, un átomo dador de electrones transfiere uno o más electrones a un átomo aceptor de electrones y con ello se logra la atracción electrostática (análoga, por ejemplo, a la atracción que un imán ejerce sobre el hierro) entre partículas con cargas eléctricas de signo contrario: los cationes, con carga positiva, y los aniones, con carga negativa. Este tipo de enlace se establece entre átomos de elementos electropositivos (elementos que tienen tendencia a portar una carga positiva, ubicados a la izquierda en la tabla periódica) con elementos electronegativos (elementos con tendencia a portar carga negativa, ubicados a la derecha en la tabla periódica). Esta atracción entre aniones y cationes es la que genera el enlace iónico. Las configuraciones electrónicas de los átomos involucrados después del proceso de ionización (es decir, la formación de partículas con carga eléctrica denominados iones) son muy importantes, ya que los dos han conseguido la configuración externa correspondiente a los gases nobles, ganando los átomos en estabilidad. Los sólidos iónicos están compuestos por muchos iones, que se disponen en el espacio de forma tal que cada catión está rodeado por la mayor cantidad posible de aniones a efectos de evitar las repulsiones con otros cationes. Este empaquetamiento genera un alto ordenamiento denominado estructura cristalina. En el caso particular del cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ , sal de cocina) se produce una red cúbica en la que, en los vértices, se alternan iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ .



**Figura 2.1.** Estructura cristalina del cloruro de sodio donde se observa que cada ión está rodeado de iones de carga opuesta.

De esta forma, cada ión  $\text{Cl}^-$  queda rodeado de seis iones  $\text{Na}^+$ , y recíprocamente (**Figura 2.1**). La mayoría de los sólidos iónicos son muy poco conductores de la electricidad, a menos que se los funda y lleve al estado líquido.

2. **COVALENTE:** en el enlace covalente no existe atracción electrostática como en el caso anterior. Aquí la situación es totalmente diferente, pues en este caso los dos átomos comparten los electrones ubicados en su capa más externa (denominados electrones de valencia). En este caso dos átomos se acercan entre sí ofreciéndose, mutuamente, el electrón más externo de su capa electrónica. De esta manera, la participación de los dos electrones involucrados genera una unión muy fuerte. Esto ocurre, particularmente, para los elementos que tienen la misma tendencia a ceder o a recibir electrones (por ejemplo carbono y silicio). Al igual que los sólidos iónicos, la localización de los electrones de valencia hace que los compuestos con enlaces covalentes sean pobres conductores eléctricos.

3. **METÁLICO:** el enlace metálico se realiza entre elementos metálicos que de esta manera forman redes cristalinas con elevado ordenamiento. En el enlace metálico, los electrones se desplazan alrededor de muchos átomos. Intuitivamente, la red cristalina metálica puede considerarse formada por una serie de núcleos atómicos positivos localizados en posiciones fijas, alrededor de los cuales los electrones libres forman una nube que mantiene unido al conjunto. La presencia de esa nube electrónica genera una alta conductividad térmica y eléctrica, como así también le provee el brillo característico a los metales.

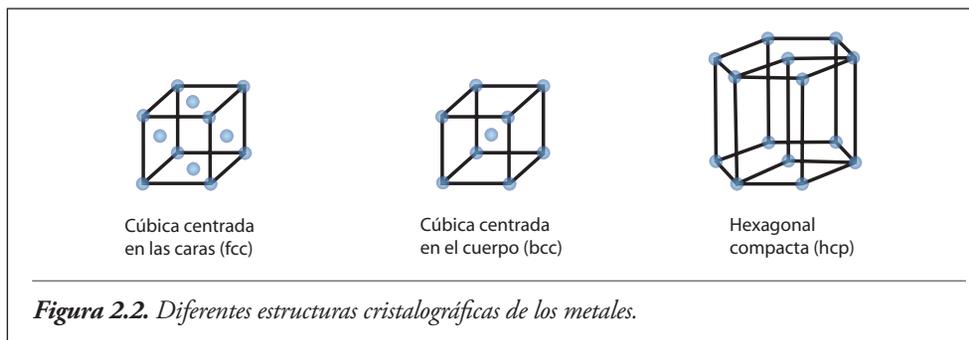
## □ 2.2 Algunos tipos de materiales

### 2.2.1 Metales

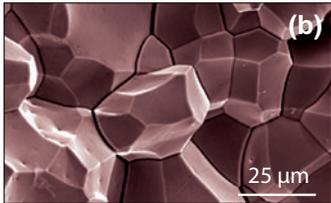
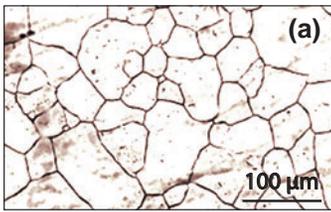
Los metales fueron los primeros materiales que revolucionaron el modo de vida de la humanidad, acompañándola, virtualmente, desde el inicio de su existencia. Salvo algunas excepciones, como lo son los metales preciosos (platino, oro, plata, etc.), los metales rara vez se encuentran en la naturaleza en forma pura, por lo que tuvieron que desarrollarse métodos para obtenerlos. Esta importancia radica en que los metales resultan insustituibles en muchas aplicaciones debido a sus particulares propiedades mecánicas y electrónicas.

Los metales, en su estado natural, son relativamente blandos; es decir, muy fáciles de deformar. Sin embargo, por medio de diversos tratamientos puede conseguirse que aumenten su dureza. También pueden fabricarse *aleaciones*, que son mezclas de distintos metales y que originan materiales más duros que sus componentes originales.

La mayoría de los metales y aleaciones metálicas tienen a sus átomos distribuidos según alguna de las estructuras cristalográficas mostradas en la **figura 2.2**, y que se denominan *cúbica centrada en las caras (fcc: face-centered cubic)*, *cúbica centrada en el cuerpo (bcc: body-centered cubic)* y *hexagonal compacta (hcp: hexagonal closed-packed)*.



A su vez, los metales están formados por una gran cantidad de cristales (o granos) que pueden ser observados con el microscopio óptico luego de atacarlos, adecuadamente, con reactivos



**Figura 2.3.** (a) Metalografía de un acero inoxidable donde se aprecian los límites de grano de la aleación. (b) Imagen por microscopía electrónica de barrido de titanio comercialmente puro mostrando los granos que forman el material.

químicos determinados mediante un proceso denominado *metalografía* (**Figura 2.3a**); o mediante la fractura de dichos materiales bajo determinadas condiciones, y su posterior observación con el microscopio electrónico de barrido (**Figura 2.3b**). En el primer caso, la diferencia entre un grano y sus vecinos radica en la distinta orientación de su estructura cristalina y lo que se observa es la traza de los límites de granos, mientras que en el segundo se observan los granos directamente.

Las aleaciones metálicas se usan, sistemáticamente, para fabricar elementos estructurales (que deben soportar cargas) y es imprescindible que tengan una buena resistencia a la corrosión (degradación de un material por el medio que lo rodea). La corrosión es un problema general de los metales. Algunos metales escapan a este problema, como los preciosos (platino y oro). Otros, al formar una capa de óxido protectora sobre su superficie, lo pasivan y protegen del proceso corrosivo, tal como ocurre con el titanio y los aceros inoxidable.

---

## 2.2.2 Cerámicos

---

Cronológicamente, las cerámicas aparecieron después que los metales y, debido a que nunca existió un período específico en el que fuera el material más relevante, su importancia no quedó plasmada en una Edad de la Cerámica equivalente a la Edad del Hierro o Edad del Bronce, tal como ocurrió con los metales. La fabricación de ladrillos permitió la construcción de casas que resistían a las inclemencias del tiempo, y los recipientes de barro cocido permitieron el almacenamiento de agua y alimentos. Hoy en día, existen muchos tipos de cerámicas que se destacan debido a su gran variedad de propiedades.

Las cerámicas son los materiales más duros que existen, pero por eso mismo no soportan los golpes y se quiebran con mucha facilidad. Existen aplicaciones donde la resistencia a la deformación es fundamental; por ejemplo, en una escultura, cuya forma tiene valor artístico y no puede permitirse que la pierda. Por lo tanto, no es de extrañarse que estas obras casi siempre sean de cerámica, aunque haya que pagar el precio de tener cuidados especiales con ellas puesto que, como es harto sabido, si llegan a caerse se destruyen por completo. Otra característica de las cerámicas es que resisten muy bien las altas temperaturas: a temperaturas para las cuales otros materiales ya se encuentran en estado líquido, las cerámicas siguen siendo sólidas e incluso, en algunos casos, su dureza aumenta.

Las cerámicas, al no ser reciclables, incrementan sus costos de fabricación. La gran mayoría de las cerámicas son malas conductoras de la electricidad y muchas aplicaciones tecnológicas se derivan de esta propiedad: es común ver piezas de cerámica utilizadas como aislantes eléctricos en las líneas de transmisión urbanas.

## 2.2.3 Polímeros (Plásticos)

A diferencia de los metales y las cerámicas, los polímeros hicieron su aparición mucho más recientemente. Los polímeros son materiales orgánicos que se obtienen a partir del petróleo y se caracterizan por su poca resistencia a la temperatura. Cuando se someten a altas temperaturas, los termoplásticos se derriten, mientras que los plásticos termo resistentes se chamuscan o se queman.

Los **polímeros** son mucho más blandos que los metales y, en cuanto a su conductividad térmica, son mejores aislantes que las cerámicas. Tanto sus propiedades de aislamiento eléctrico como de aislamiento térmico están limitadas por su poca resistencia a la temperatura. A bajas temperaturas el mejor aislante será un polímero, pero a altas temperaturas, las cerámicas siempre serán la mejor opción. En todos aquellos casos en que no es necesaria resistencia a altas temperaturas, los polímeros han logrado introducirse en todos los ámbitos, desplazando muchas veces a otros materiales más consolidados. Las bolsas del mercado están hechas de polietileno y dejaron en el olvido a aquellas hechas de fibras naturales. El poliéster, a su vez, compite también con bastante éxito con las fibras naturales en la industria del vestido. Los polímeros más duros han reemplazado a las cerámicas en la fabricación de vasos y platos que no se rompen al caer, y también pueden reemplazar a los metales en la fabricación de tornillos y otros componentes estructurales en máquinas ligeras.

## 2.2.4 Materiales compuestos

Un material compuesto es un material que está formado por dos materiales diferentes, combinados de modo tal que se puedan aprovechar las propiedades mecánicas ventajosas de cada uno de ellos. Un ejemplo típico de material compuesto es el plástico reforzado con fibras. Entre estos el más común es la fibra de vidrio (fiberglass) que está formado por pequeñas fibras de vidrio (glass fibers) encapsuladas por medio de una resina de poliéster. Las fibras de vidrio son muy duras, pero al doblarse se quiebran con facilidad. El poliéster es muy flexible y fácil de deformar. Cuando los dos materiales se combinan, el plástico que sostiene a las fibras evita que éstas se doblen y quiebren, mientras que las fibras no permiten que el conjunto se deforme. De este modo, se consigue un material mucho más resistente a la rotura que cada uno de los materiales que lo constituyen. Con fibra de vidrio se fabrican desde carrocerías de automóviles hasta tablas de surf. Otro ejemplo de plástico reforzado con fibras es la fibra de carbono que se utiliza para fabricar bicicletas de carrera o raquetas de tenis, debido a que combina una alta resistencia mecánica con un muy bajo peso. La tecnología moderna permite el uso de diversos materiales para fabricar los distintos componentes de un dispositivo de acuerdo a los requerimientos del mismo (**Figura 2.4**).



**Figura 2.4.** Auto moderno cuyas partes están construidas de diversos materiales, según las propiedades específicas que se requieran.

## □ 2.3 Propiedades mecánicas de los materiales

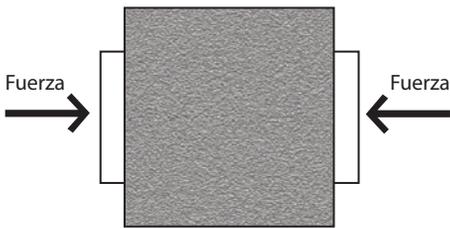
### 2.3.1 Esfuerzos a los que están sometidos los materiales

Muchos materiales cuando están en servicio, están sometidos a esfuerzos mecánicos y, en tales condiciones, es necesario conocer las características del material para poder diseñar la estructura o dispositivo de interés, de forma tal que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido no sean excesivos y que el material se rompa. El conocimiento de las propiedades mecánicas de un material implica el conocer la relación existente entre las fuerzas aplicadas y la deformación resultante.

Los materiales se seleccionan para diversas aplicaciones y componentes a partir del conocimiento de las propiedades del material y de las condiciones funcionales requeridas por dicho componente o dispositivo. El primer paso en el proceso de selección requiere del análisis de la aplicación para determinar las características más importantes que debe poseer el material.

**¿Debe ser resistente, rígido o dúctil? ¿Estará sometido a la aplicación de una gran fuerza, o a una fuerza súbita intensa? ¿Estará en contacto con medios agresivos?**

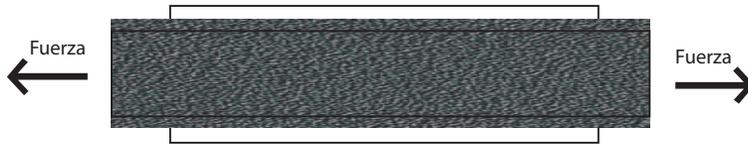
Una vez determinadas las propiedades requeridas, se selecciona el material apropiado usando datos que se encuentran en manuales y tablas. Sin embargo, se debe conocer cómo se obtienen los datos listados en los manuales, saber qué significan y darse cuenta de que resultan de pruebas ideales que pueden no aplicarse con exactitud a casos reales. En esta sección se analizarán algunas propiedades mecánicas de un material que deben conocerse, previo a su selección para una aplicación específica.



**Figura 2.5.** Material sometido a fuerzas de compresión donde se comparan su forma inicial (en blanco) con su forma final (en gris). Las flechas muestran la dirección y sentido de la aplicación de las fuerzas.

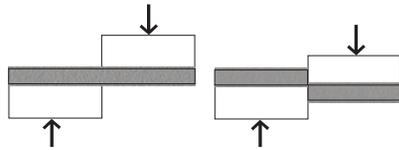
Las fuerzas de compresión son las que, aplicadas sobre el eje longitudinal del material, tienden a acercar los extremos (**Figura 2.5**). Como consecuencia de ello, se produce una disminución en la longitud de la pieza y un incremento de área sobre la sección transversal. La resistencia a la compresión de un material es la máxima tensión de compresión que puede soportar dicho material sin que se produzca su rotura.

Las fuerzas de tracción son las que, aplicadas sobre el eje longitudinal del material, tienden a separar sus extremos (**Figura 2.6**). Como resultado de estas fuerzas, la pieza incrementa su longitud y se produce una disminución en su sección transversal. La resistencia a la tracción de un material está relacionada con la máxima tensión de tracción que soporta sin que se produzca su rotura.

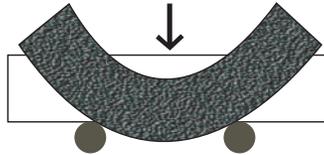


**Figura 2.6.** Material sometido a fuerzas de tracción donde se comparan su forma inicial (en blanco) con su forma final (en gris). Las flechas muestran la dirección y sentido de la aplicación de las fuerzas.

Otros tipos de esfuerzos a los que están sometidos los materiales son las fuerzas de corte, que son las cargas que actúan sobre una pieza y que le provocan un deslizamiento tangencial de dos partes en contacto en una sección plana (**Figura 2.7**); las fuerzas de flexión, que son las que se aplican transversalmente al eje longitudinal de la pieza y que provocan sobre ella una deformación por giro de las secciones paralelas a la fuerza actuante (**Figura 2.8**); y las fuerzas de torsión, que son un par de fuerzas opuestas que tienden a hacer girar a un material sobre su eje longitudinal (**Figura 2.9**).



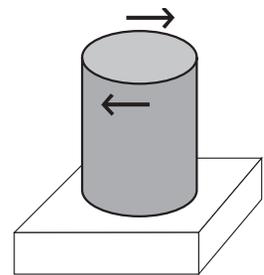
**Figura 2.7.** Material sometido a esfuerzos de corte donde se comparan el estado inicial (a la izquierda) con el final (a la derecha). Las flechas muestran la dirección y sentido de la aplicación de las fuerzas.



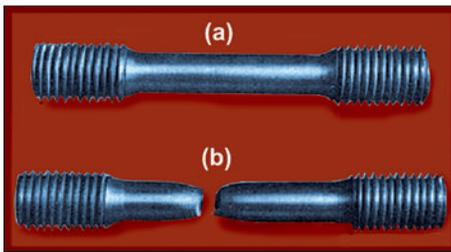
**Figura 2.8.** Material sometido a esfuerzos de flexión, donde la flecha indica la dirección y sentido de la aplicación de la fuerza sobre el material, que se encuentra apoyado en sus extremos. La situación inicial se muestra en blanco y la final en gris.

### 2.3.2 Ensayos de tracción. Conceptos de tensión y deformación

El experimento básico para determinar las propiedades mecánicas de un material es el denominado *ensayo de tracción*. Este ensayo consiste en deformar la muestra (denominada probeta) hasta la rotura, incrementando gradualmente la tensión que se le aplica uniaxialmente (en una sola dirección) a lo largo del eje longitudinal de la muestra. Las muestras, normalmente, tienen sección transversal circular, como la mostrada en la **figura 2.10a**, aunque también suelen emplearse probetas de sección rectangular. La muestra se fija a la máquina de tracción por sus extremos a través de mordazas o soportes, que a su vez la someten a deformación a velocidad constante a través de un sistema de palancas, mecánico o hidráulico (**Figura 2.11**).



**Figura 2.9.** Material sometido a esfuerzos de torsión, donde las flechas indican la dirección y sentido de la aplicación de las fuerzas sobre un material que se encuentra adherido firmemente a la base donde está apoyado.



**Figura 2.10.** (a) Probeta de sección circular para ensayos mecánicos. (b) Probeta luego del ensayo donde se puede observar la fractura y que se ha incrementado su longitud total.

La máquina mide, simultáneamente, la fuerza aplicada (por medio de un dispositivo denominado celda de carga o strain-gauge) y la deformación resultante (por medio de un *extensómetro*). Estos ensayos de tracción duran, generalmente, unos pocos minutos y es un ensayo del tipo destructivo ya que la muestra es deformada hasta su rotura, tal como se muestra en la **figura 2.10b**.

Los dos parámetros fundamentales asociados con el comportamiento de los materiales sometidos a fuerzas mecánicas son la tensión y la deformación. La **figura 2.12a** muestra una varilla de sección transversal uniforme de superficie  $A1$  y longitud  $L1$ . Si actúa una fuerza  $F$  longitudinalmente sobre la varilla, ésta se estirará hasta una longitud  $L2$  y la superficie de la sección transversal se reducirá a  $A2$ , como se muestra en la **figura 2.12b**. La tensión es una medida de la fuerza que actúa por unidad de superficie en la sección transversal. Esto es:

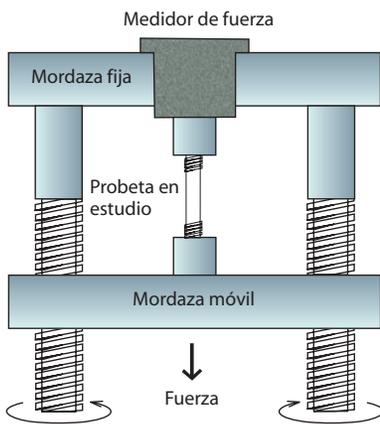
$$\text{Tensión } (\sigma) = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Superficie de la sección}} = \frac{F}{A1}$$

La unidad de fuerza es el Newton y la superficie es medida en metros cuadrados, de manera que las unidades de tensión mecánica son Newton por metro cuadrado ( $N/m^2$ ). Esta unidad, también, es denominada como Pascal (Pa) y es habitual emplear múltiplos de esta unidad, tal como Mega Pascal –MPa– que corresponde a un millón de Pascales; o Giga Pascal –GPa– que corresponde a mil millones de Pascales.

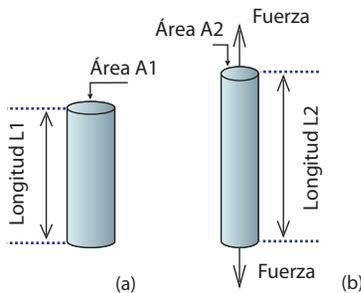
La deformación es una medida de la modificación dimensional que se produce al actuar una fuerza. Puede ser medida en términos del cambio de longitud o de superficie de la sección y está relacionada con la dimensión original y expresada en porcentaje. De esta manera:

$$\text{Deformación } (\xi) = \frac{\text{Cambio de longitud}}{\text{Longitud original}} \times 100 = \frac{L2 - L1}{L1} \times 100$$

La tensión y la deformación mecánicas están referidas a valores por unidad de área y de longitud, respectivamente, y por ello pueden ser utilizadas para definir las propiedades mecánicas de cualquier material sin hacer referencia al tamaño real del cuerpo sobre el que es realizado el ensayo.



**Figura 2.11.** Esquema de una máquina para ensayos de tracción uniaxial donde se muestran sus componentes principales.



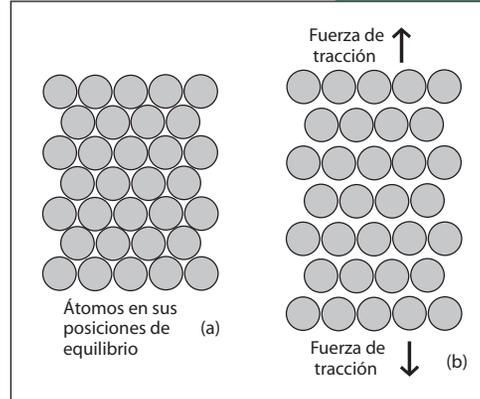
**Figura 2.12.** Alargamiento de una varilla cuando se aplica sobre ella una fuerza unidireccional  $F$ .

### 2.3.3 Deformaciones elástica y plástica

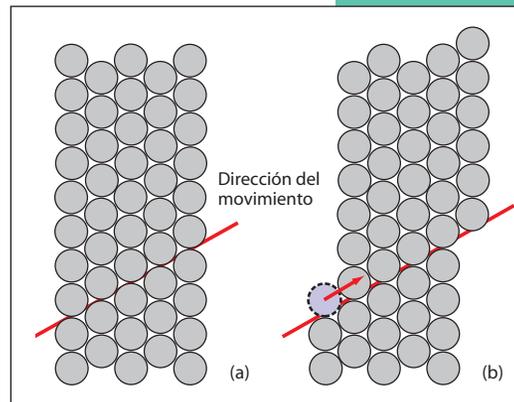
Si un material está en reposo, hay un ordenamiento de los átomos como se muestra la **figura 2.13a**. Los átomos se encuentran en sus posiciones de equilibrio correspondiente a un mínimo de energía. Sin embargo, la aplicación de una fuerza mecánica tiende a desplazar estos átomos de su posición de mínima energía (**Figura 2.13b**). La energía introducida en el sistema por la fuerza mecánica es utilizada para mover los átomos hacia posiciones de mayor energía. Las propiedades mecánicas indican en qué medida puede producirse ese desplazamiento.

Si las fuerzas aplicadas son pequeñas, los átomos no modifican sus posiciones relativas sino que, simplemente, se desplazan de sus posiciones de equilibrio en virtud de la energía aplicada. En estas circunstancias, si es retirada la fuerza, los átomos vuelven a sus posiciones originales. Esta deformación es, por lo tanto, reversible o elástica. Todos los materiales cambian reversiblemente al ser aplicadas cargas pequeñas. Cuando se aplica una fuerza a un material, los enlaces entre los átomos se estiran y el material se alarga. Cuando se retira la fuerza, los enlaces retornan a su longitud original y la probeta vuelve a su tamaño inicial (análogo a un resorte).

Si las fuerzas son mayores puede ocurrir una de dos cosas: que el material se fracture, lo que significa que las uniones entre los átomos se rompen completamente al ser aplicada una energía a nivel interatómico mayor que la energía de la unión en sí misma; o que el material se siga deformando, pero en este caso en forma irreversible o plásticamente. En este caso algunos de los átomos han tenido que moverse a una posición nueva como lo indica la **figura 2.14**, pero las distancias interatómicas se mantienen dentro de los límites correspondientes a la deformación elástica.



**Figura 2.13.** (a) Átomos en sus posiciones de equilibrio. (b) Átomos separados por la acción de una fuerza.

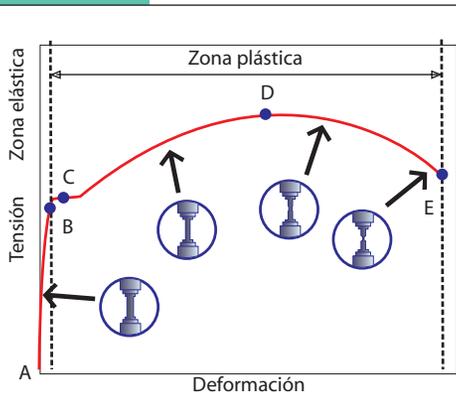


**Figura 2.14.** Movimientos atómicos que producen la deformación plástica.

### 2.3.4 Propiedades de tracción

Las principales propiedades mecánicas que pueden ser determinadas por medio de los ensayos de tracción son las que a continuación se detallan (**Figura 2.15**):

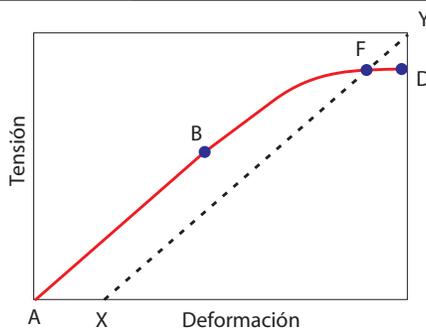
- **límite elástico:** para muchos materiales estructurales se ha encontrado que la parte inicial de la gráfica tensión-deformación puede ser aproximada por la recta AB de las **figura 2.15** y **figura 2.16**. En este intervalo, la tensión y la deformación son



**Figura 2.15.** Gráfico tensión-deformación obtenido en un ensayo de tracción uniaxial, mostrando el aspecto de la muestra en determinados instantes durante el ensayo (para la explicación del significado de cada letra, ver el texto).

proporcionales entre sí. De esta manera, cuando aumenta la tensión en un material, la deformación aumenta en forma proporcional;

Ya en 1678, el físico inglés Robert Hooke había demostrado que un material sólido sometido a una fuerza de tracción se extiende en la dirección de la tracción en una cantidad que es proporcional a la carga aplicada, por lo que se dice que el comportamiento del material en esta región cumple con la Ley de Hooke, de forma tal que cualquier incremento en la tensión resultará en un aumento proporcional a la deformación. Si se retira la carga aplicada sobre la probeta, la deformación regresará a cero (el extensómetro marcará cero), indicando que la deformación producida por la carga es elástica. Si la carga se aumenta continuamente y se libera después de cada incremento, cuando se revisa el extensómetro, se alcanzará un punto en el que éste no regresa a cero. Esto indica que ahora el material tiene una deformación permanente y que se ha sobrepasado el límite elástico; por tanto, el límite elástico puede definirse como el esfuerzo mínimo al que ocurre la primera deformación permanente.



**Figura 2.16.** Parte inicial de una curva tensión-deformación donde se muestra cómo se obtiene experimentalmente el límite de fluencia.

- **resistencia a la fluencia** (Yield strength): es la carga a la cual un material exhibe una desviación especificada de la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. Por lo general, este valor se determina por el método de la deformación permanente especificada. En la **figura 2.16** la deformación especificada AX se marca sobre el eje de la deformación. Enseguida, se traza la línea XY paralela a AB, localizando de esta manera el punto F intersección de la línea XY con el diagrama carga-deformación. El valor de la carga en el punto F indica la resistencia a la fluencia. El valor de la deformación permanente especificada suele ser el 0,20% de la longitud calibrada (correspondiente a AX). Al Yield strength, habitualmente, se lo representa como  $\sigma_{0,2}$ ;

(**Figura 2.15**) hasta que se alcanza el esfuerzo máximo en el punto D. Por tanto, la resistencia máxima (o resistencia a la tracción) es la carga máxima soportada por el material, basado en el área transversal original;

- **tensión (o resistencia) a la ruptura:** para un material dúctil, hasta el punto de resistencia máxima, la deformación es uniforme a lo largo de la longitud de la barra. A la carga máxima, la probeta experimentará una deformación localizada o formación de un adelgazamiento sobre la muestra y la carga disminuirá a medida que el área decrece. Esta elongación en forma de cuello es una deformación no uniforme y ocurre rápidamente hasta el punto en que el material se rompe. La resistencia a la ruptura (punto E

en la **figura 2.15**) es determinada al dividir la carga de ruptura por el área transversal original, y es siempre menor que la resistencia máxima. Para un material frágil, la resistencia máxima y la resistencia de ruptura coinciden;

- **ductilidad:** la ductilidad de un material se determina a partir de la deformación que soporta hasta que se fractura. Ésta se determina en un ensayo de tracción mediante dos técnicas:

**alargamiento, deformación o elongación a la rotura:** se determina juntando después de la fractura las partes de la muestra  $x$ , midiendo la longitud final de la misma y empleando la expresión:

$$\text{Elongación (\%)} = \frac{L_f - L_i}{L_i} \times 100$$

donde  $L_f$  y  $L_i$  son las longitudes finales e iniciales de la probeta utilizada en el ensayo.

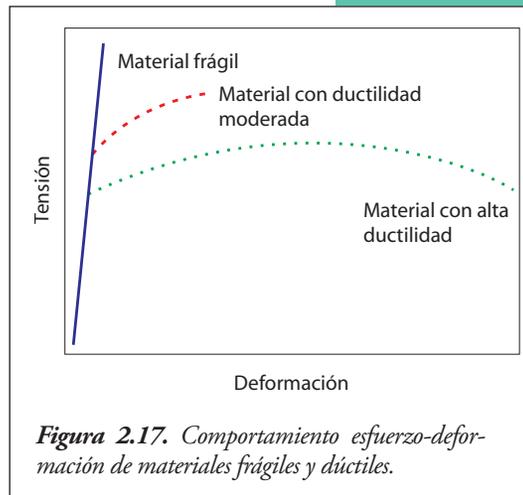
**reducción en área:** ésta también se determina a partir de las mitades rotas de la muestra utilizada en el ensayo de tracción, midiendo para ello el área transversal mínima y con la fórmula:

$$\text{Reducción de área (\%)} = \frac{A_i - A_f}{A_i} \times 100$$

donde  $A_i$  es el área transversal original y  $A_f$  el área transversal final.

Los materiales dúctiles exhiben una curva tensión-deformación que llega a su máximo en el punto de resistencia máxima (**Figura 2.17**). En materiales más frágiles, la carga máxima o resistencia a la tensión ocurre en el punto de falla. En materiales extremadamente frágiles, como cerámicos, la resistencia a la tensión y la tensión de ruptura son iguales (**Figura 2.17**).

La ductilidad es importante para el diseño y la fabricación. El diseñador de un componente preferirá un material que tenga cierta ductilidad, de manera que, si la tensión aplicada es demasiado alta, el componente se deforme plásticamente antes de romperse. Un fabricante deseará un material dúctil de manera que pueda producir piezas de formas complicadas sin que el material se rompa durante el proceso.



**Figura 2.17.** Comportamiento esfuerzo-deformación de materiales frágiles y dúctiles.

La ductilidad puede ser cuantificada en términos de la deformación producida al ocurrir la fractura. Los materiales frágiles tienen ductilidad prácticamente cero; mientras que un material muy dúctil puede tener entre 50 y 70% de ductilidad. Algunos polímeros pueden mostrar una ductilidad por encima de 500%. La capacidad de un material para deformarse plásticamente está determinada por su estructura. Considerando las sustancias altamente cristalinas con uniones iónicas

o las sustancias metálicas, la ductilidad está controlada por las características de los átomos y las uniones interatómicas. Así, en un metal puro, cada átomo tiene vecinos cercanos idénticos y no existen uniones direccionales. No hay, por lo tanto, restricciones a la posición de cualquier átomo en el reticulado y por ello los metales puros tienden a ser muy dúctiles. La situación en las aleaciones es mucho más compleja. En las uniones iónicas existen dos o más especies iónicas y éstas son mantenidas ensambladas por uniones fuertes y direccionales. El movimiento de los iones en este caso es sumamente difícil y en algunos casos es imposible, debido a que representaría forzar al acercamiento a una gran cantidad de átomos similares. Las estructuras cerámicas, por este motivo, no exhiben prácticamente ductilidad.

Los polímeros son mantenidos en estado sólido, principalmente, por medio de fuerzas de valencia secundaria. La tensión aplicada puede alterar estas uniones intermoleculares con facilidad, de manera que el deslizamiento de las moléculas, unas sobre las otras, puede dar lugar a grandes deformaciones plásticas. Es aquí donde podemos ver con claridad el concepto de la resistencia de un sólido como vinculada a su eslabón más débil. Es posible encontrar una amplia gama de comportamiento en los polímeros; sin embargo, así como existen polímeros muy dúctiles, hay otros, como el polimetacrilato de metilo, que tienen grupos colaterales grandes en las moléculas y ello impide el deslizamiento de las moléculas entre sí, de manera que el material puede ser relativamente frágil;

- **tenacidad:** la tenacidad es la energía absorbida en el campo plástico y corresponde a la capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse; y corresponde al área bajo la totalidad de la curva tensión-deformación en el ensayo de tracción. Ésta es, principalmente, una propiedad del intervalo plástico, ya que sólo una pequeña parte de la energía total absorbida es energía elástica que puede recuperarse cuando se suprime el esfuerzo.
- **dureza:** es muy frecuente que la dureza y tenacidad sean fácilmente confundidas a pesar de que tienen conceptos totalmente diferentes. Por ejemplo, es un hecho conocido que el diamante es el material más duro que existe; no obstante, no es tenaz ya que si se le da un martillazo se romperá en muchos pedazos, aunque el acero del martillo sea menos duro. Sin embargo, las barras metálicas que forman parte de una estructura de hormigón armado son muchísimo más tenaces que el diamante, aunque el diamante tenga una dureza mucho mayor.

*La dureza* se relaciona con la capacidad que tiene un material de soportar esfuerzos sin deformarse permanentemente. Hay diversas formas de medir la dureza, si bien la mayoría consiste en utilizar un indentador, esto es, un dispositivo que trata de penetrar el material, como podría ser una pequeña cuña o una aguja. Por ejemplo, si se intenta comparar la dureza de un trozo de plastilina con la de un vaso de vidrio, podríamos utilizar un lápiz como indentador. El lápiz penetra sin dificultad la plastilina, demostrando que el lápiz es más duro que la plastilina. Por otra parte, el lápiz no puede atravesar el vaso de vidrio, así que el vidrio es más duro que el lápiz. Del resultado de ambos experimentos también podemos concluir que el vidrio es más duro que la plastilina;

- **resistencia al impacto:** en la discusión que se ha venido llevando a cabo sobre las propiedades mecánicas de los materiales, hasta ahora se había supuesto que el material era sometido a fuerzas progresivamente en aumento. Sin embargo, la situación real no es tan simple. Las tensiones pueden ser aplicadas muy repentinamente y es necesario caracterizar el comportamiento del material en estas condiciones. El factor crítico para determinar este comportamiento es la capacidad del material para absorber energía. Un material que puede absorber una gran cantidad de energía mecánica será capaz de resistir una fuerza que es aplicada en forma súbita. Decimos entonces que ese material tiene alta resistencia al impacto, la que es medida como la cantidad de energía que es absorbida antes de la fractura.

Por todo lo expuesto, se destaca que no existe un único parámetro que permita caracterizar a un material, sino que deben ser empleados varios en función de la aplicación requerida. No obstante ello, es frecuente describir mecánicamente a un material a través de 3 parámetros: límite de fluencia y la tensión y deformación de ruptura. En la **tabla 2.1** se muestran (a modo de ejemplo) los valores de propiedades mecánicas de 3 materiales de distinto origen (cerámico, metálico y plástico).

**VALORES DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES DE DISTINTO ORIGEN.** TABLA 2.1

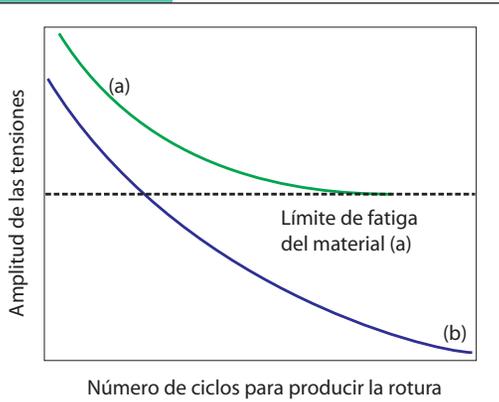
Material	Límite de fluencia ( $\sigma_{0.2}$ ) (MPa)	Tensión de ruptura (MPa)	Deformación a la ruptura (%)
Alúmina ( $Al_2O_3$ ) (cerámico)	---	1000 a 10000	0
Acero Inoxidable tipo 316 (metal)	240	600	55
Polietileno (plástico)	---	30	15-100

Cuando se quiere construir una pieza estructural se requiere que dicha pieza resista las fuerzas que se apliquen sobre ella. A los efectos prácticos, si la pieza se deforma o se rompe el resultado será el mismo: una falla de funcionamiento. Para que sea confiable, el material no debe sufrir ningún cambio a partir de su forma original durante su función.

### 2.3.5 Resistencia a la fatiga

Si se aplica una tensión a un material, éste puede ser deformado o fracturado como se indicó anteriormente. Por ese motivo, un determinado material puede ser caracterizado por medio de sus valores de resistencia y ductilidad. Estos valores, sin embargo, están referidos a la aplicación de una única tensión. Si el material es sometido a tensiones repetidas puede ser fracturado con una tensión mucho más baja que la resistencia a la rotura normal y, a menudo, aún más baja que la resistencia a la fluencia (este fenómeno se emplea, por ejemplo, para cortar un alambre flexionándolo repetidas veces). Esto se produce porque las fisuras y defectos internos que posee el material pueden abrirse en los sitios de concentración

de tensiones. Inicialmente estas fisuras pueden ser muy pequeñas, demasiado para tener algún efecto en condiciones normales, pero la aplicación repetida de la tensión las abre y, eventualmente, se puede provocar una fractura.



**Figura 2.18.** Curvas de fatiga que muestran la relación entre la amplitud de tensión y la cantidad de ciclos necesaria para provocar la rotura de dos materiales diferentes (a y b).

Existen varios parámetros que definen el comportamiento de los materiales ante la fatiga. El ensayo es llevado a cabo aplicando ciclos de tensiones y registrando el número de ciclos necesarios para producir la fractura y repitiendo esto a diferentes niveles de tensión, confeccionando un gráfico de la tensión (esto es, la diferencia entre las tensiones máxima y mínima, en un ciclo) y su relación con la cantidad de ciclos necesarios para producir la fractura. La **figura 2.18** muestra un ejemplo de este tipo de gráfico. Los valores para algunos materiales (**Figura 2.18a**) muestran una tensión por debajo de la cual no hay falla por fatiga, cualquiera sea el número de ciclos. Esa tensión se encuentra a menudo entre 30 y 50% de la resistencia a la rotura. Otros materiales no presentan límite de fatiga (**Figura 2.18b**). Su comportamiento está caracterizado por el límite de durabilidad, que es el nivel de tensión con el cual se produce la fractura después de un número especificado de ciclos, generalmente  $10^7$  (10 millones de ciclos).

La fatiga es un factor importante, ya que muchos equipos o estructuras están sometidos a tensiones repetidas más que a una única tensión. Es de importancia notar que las concentraciones de tensiones que inician las fisuras, generalmente se producen en defectos superficiales y que muchas fracturas por fatiga están asociadas con un deficiente acabado de la superficie.

### 2.3.6 Deformación dependiente del tiempo

En el análisis tensión-deformación que se ha venido llevando a cabo hasta aquí, se asume que, si se aplica una tensión a un material, la deformación asociada con ella se produce en forma instantánea. Aunque esto es así para muchos materiales, no siempre es el caso, ya que puede existir una deformación asociada con el tiempo de aplicación de la tensión. Existen dos fenómenos para considerar en este tema que, aunque relacionados, conciernen a dos tipos diferentes de material:

1. el denominado **VISCOELASTICIDAD**, que está relacionado con los polímeros. Es la respuesta lenta de un material a una tensión aplicada de manera tal que la deformación va por detrás de la tensión. A un polímero puede llevarle varios segundos alcanzar la deformación que está asociada con el nivel de tensión aplicada. El término es utilizado debido a que el material exhibe características de un fluido viscoso, así como las de un sólido elástico. La viscoelasticidad puede ser relevante al analizar el uso de algunos materiales poliméricos;

2. el **FENÓMENO DEL CREEP**, o escurrimiento, que puede ser observado en algunos materiales. Bajo las condiciones apropiadas la mayoría de los materiales continúa deformándose si la tensión es mantenida, aunque no sea aumentada, después de que ha sido alcanzado el valor instantáneo de deformación. Con los metales esto resulta evidente sólo a temperaturas cercanas al punto de fusión, pero no es observado a temperatura ambiente.

---

### 2.3.7 Desgaste

---

La calidad de la mayoría de los productos depende de la condición de su superficie y del deterioro debido al uso. Este deterioro suele ser el factor principal que limita la vida útil y el desempeño de componentes. El desgaste es el deterioro no intencional resultante del empleo o del medio ambiente y debe considerarse como un fenómeno superficial. El desgaste es una de las acciones más destructivas a las que está sometido un material y la importancia de la resistencia al desgaste no necesita ampliarse. El desplazamiento y la separación de partículas de una superficie pueden producirse por el contacto con otro material de similares características o con otro tipo de material. Cada forma de desgaste está afectada por una cantidad de parámetros que incluyen el medio ambiente, el tipo de carga aplicada, las velocidades relativas de las partes en contacto, el lubricante, la temperatura, dureza, terminación de la superficie, presencia de partículas extrañas (denominada desgaste por tercer cuerpo) y composición y compatibilidad de las piezas en contacto. Como en la mayoría de las aplicaciones el desgaste rara vez puede evitarse por completo, aún con la mejor lubricación, debe disponerse de materiales que en contacto produzcan la menor velocidad de desgaste posible.

Como se habrá podido apreciar a lo largo del presente capítulo, la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales, no es simplemente un ejercicio dentro de la ciencia de los materiales, sino que es indispensable para el diseño de estructuras que deberán soportar cargas. Quienes diseñen estas estructuras deben determinar las tensiones en servicio de todos los componentes estructurales y estar seguros de que en cada punto estas tensiones estén bien por debajo del límite de fluencia del material y que, además, si están involucradas tensiones cíclicas, las tensiones en servicio deben estar por debajo del límite de fatiga.

Sin embargo, aún teniendo en cuenta todas las propiedades de los materiales a la hora de diseñar una estructura o dispositivo, su vida útil puede verse drásticamente reducida si no se consideran, además, los procesos de degradación de los materiales con el tiempo. Por ejemplo, ¿por qué preferimos los anillos de oro a los de latón (aleación de cobre-zinc)? Ambos materiales metálicos (oro y latón) poseen una maleabilidad adecuada para fabricar anillos y un color similar y vistoso. Sin embargo, todos preferimos que nos regalen un anillo de oro pues sabemos que el oro es un metal noble y que permanece inalterable con el paso del tiempo, mientras que el latón pierde su brillo en contacto con la piel. En el siguiente capítulo veremos las razones por las cuales algunos metales son más resistentes que otros al paso del tiempo, de qué forma se pueden degradar y de qué manera podemos evitarlo.