

**UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA
"JOSE SIMEON CAÑAS", UCA**

Materia: MATERIALES DE CONSTRUCCION

**GUIA DE CLASES No. 3
MATERIALES DE CONSTRUCCION**



En las guías de clases anteriores se definieron conceptos fundamentales de: Ingeniería, Ingeniería Civil, Materiales de construcción, Estructura atómica y enlaces químicos.

A manera de síntesis, se puede decir que la Ingeniería es la ciencia, tecnología y arte de transformar la materia y la energía de la naturaleza, en la producción de bienes y servicios para el bienestar del hombre. La Ingeniería Civil se encarga de planificar y administrar, la colocación ordenada de cuerpos sólidos naturales o artificiales, para obtener obras de infraestructura, que sirvan al desarrollo de la civilización.

Taipei 101

El edificio más alto del mundo

Fuente: <http://www.martincabrera.com/blog/wp-images/articles/taipei-101.jpg>

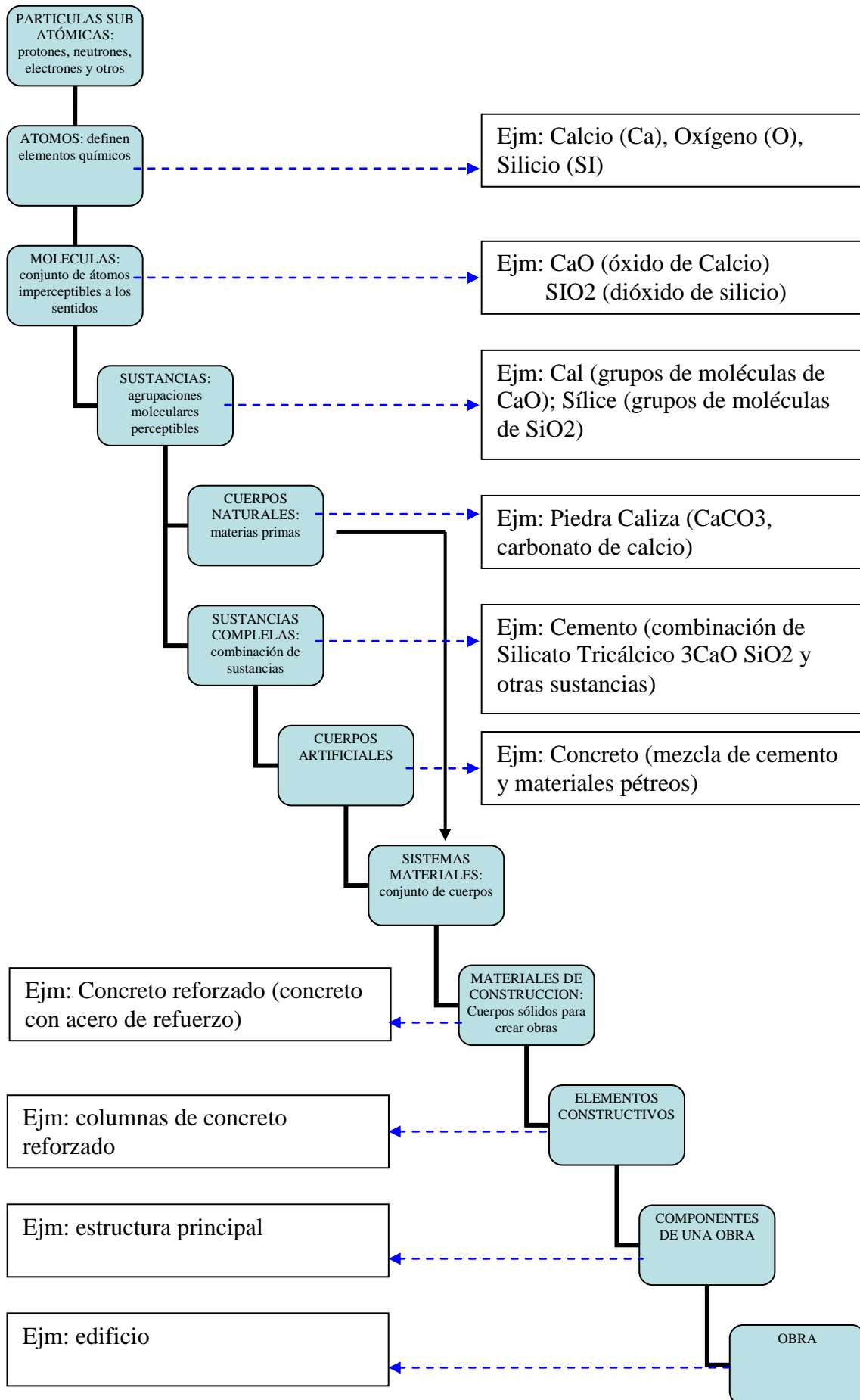
Estos cuerpos sólidos, llamados "materiales de construcción", pueden ser materias primas, que se encuentran en la naturaleza, o bien sustancias o productos fabricados por el hombre, a través de procesos químico industriales.

Aunque el objeto de la Ingeniería Civil parte del estudio y utilización de los cuerpos sólidos, éstos son porciones de materia, formadas por sustancias; las cuales son agrupaciones moleculares con propiedades perceptibles a los sentidos. Y si las moléculas o granos de un material están formados por átomos, es fácil concluir que las propiedades organolépticas, físicas, mecánicas, térmicas y eléctricas; estarán definidas por la estructura atómica, los enlaces químicos de los elementos constitutivos; así como también por reacciones químicas inducidas, en procesos de transformación de sustancias complejas.

A manera de ejemplo, considere el siguiente caso: la Ingeniería Civil estudia el diseño y construcción con el material llamado **CONCRETO**, que es una mezcla de diferentes sustancias: cemento, agua, arena y grava. Cada una de estas sustancias es perceptible a los sentidos humanos y a herramientas sencillas; y cada una, está formada por granos con propiedades intrínsecas y relativamente constantes. Así el caso del cemento, que es una sustancia artificial, compleja, con una fuerte capacidad aglomerante en presencia del agua. En consecuencia, las propiedades del CONCRETO estarán íntimamente relacionadas con las del CEMENTO. Y a su vez, las propiedades del cemento, dependerán de las sustancias que lo componen: SILICATO TRICALCICO, SILICATO DICALCICO, ALUMINATO TRICALCICO Y ALUMINOFERRITO TETRACÁLCICO (ver <http://dei.uca.edu.sv/mecanica/>)

En la química del cemento, el SILICATO TRICALCICO (3CaO SiO_2) influye mucho en la resistencia del material y está compuesto por 3 moléculas de CaO (CAL) por una molécula de SiO₂ (Sílice). Resulta que el CEMENTO PORTLAND, contiene un 60% de cal y un 20% de sílice; en conjunto estas dos sustancias forman el 80% del CEMENTO. Es fácil concluir que la estructura atómica de los elementos CALCIO (Ca), SILICIO (Si) y OXIGENO (O), así como sus enlaces y reacciones químicas, tendrán una fuerte influencia en las virtudes y defectos del CONCRETO.

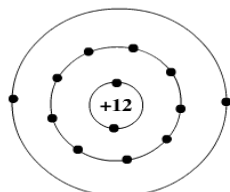




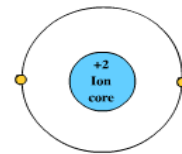
2.3. Clasificación de los materiales por su estructura atómica.

(<http://gis.uca.edu.sv/cursos/materiales/>)

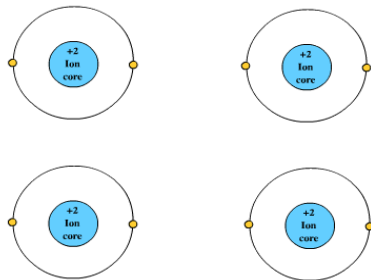
2.3.1. **Metales.** Son materiales cuyos átomos están unidos entre sí por enlaces metálicos. El enlace metálico se caracteriza por que los electrones de valencia de los átomos se separan del núcleo, teniendo la facultad para moverse libremente en todo el material razón por la cual se le llaman electrones libres. Estos se comportan como si fueran una nube que mantiene unidos a los iones positivos que quedan cuando los átomos pierden sus electrones de valencia. Esto hace que los metales tengan una elevada conductividad eléctrica y térmica. Además, el enlace metálico combinado con la microestructura hacen que los metales puedan ser deformados significativamente cuando se les aplican fuerzas. A continuación se ilustra el enlace metálico del Magnesio.



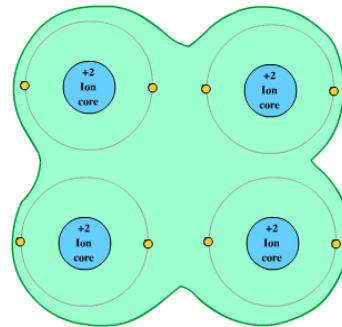
Mg



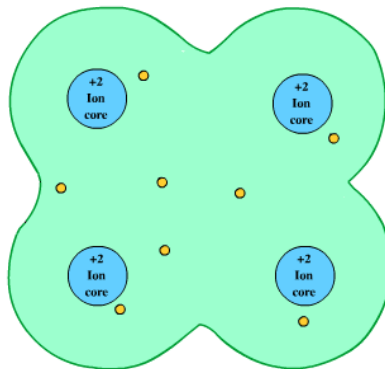
Mg+



Suponga que varios átomos se acercan entre sí para formar cierta masa de material

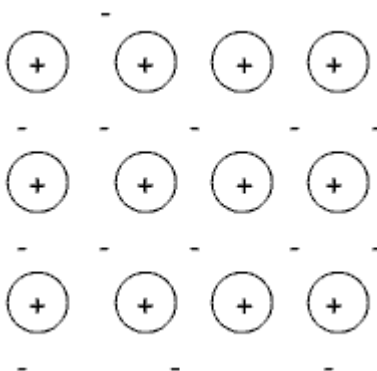


Cuando los átomos están suficientemente cerca, las cargas eléctricas de los núcleos y los electrones interactúan entre sí



Como resultado de la interacción entre cargas eléctricas, los electrones se "sueltan" de sus núcleos y comienzan a moverse en la cercanía de éstos. Un metal se idealiza entonces como un conjunto de núcleos con carga positiva rodeados de una "nube" de electrones.

Todos los metales son materiales cristalinos, es decir, sus átomos están ordenados siguiendo un patrón definido.

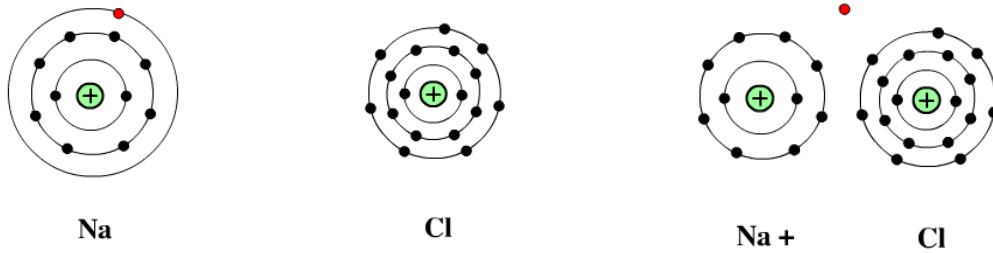


Esquema de la estructura de un metal

El enlace metálico es no-direccional. Esto hace que las dislocaciones se puedan desplazar en los metales con facilidad. Por esa razón, los metales son materiales dúctiles. Además, la no-direccionalidad de los enlaces también facilita la difusión de los átomos en la estructura cristalina. Por esa razón, los metales pueden cambiar sus propiedades por medio de tratamientos térmicos. Un tratamiento térmico no es más que un proceso de calentamiento y enfriamiento controlado de modo que se modifique la microestructura del metal.

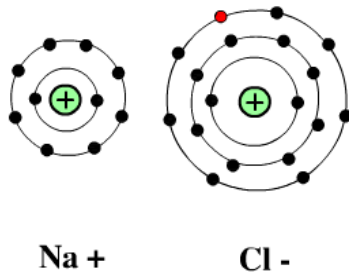
Para aplicaciones de ingeniería, los metales normalmente se utilizan aleados. Debido a esto, poseen varias fases en su estructura microscópica

- 2.3.2. **Cerámicas.** Son compuestos químicos entre elementos metálicos y no metálicos (óxidos, nitratos, carburos). Los átomos en las cerámicas están unidos entre sí por **enlaces iónicos**. Como se indicó en el numeral 2.2, este tipo de enlace consiste en que uno de los átomos pierde uno o varios electrones cediéndolo a otro átomo diferente. El átomo que pierde el electrón queda con carga positiva (catión) mientras que el átomo que lo gana adquiere carga negativa (anión). La cohesión del material resulta de la atracción electrostática que ejercen las cargas eléctricas de signo contrario. Los iones deben estar colocados de manera ordenada en los puntos de red del material de modo que éste sea eléctricamente neutro. Este enlace hace que las cerámicas no posean conductividad eléctrica ni térmica, por lo que una de sus aplicaciones principales es como aislantes de la electricidad y el calor. El enlace químico entre los átomos también hace que las cerámicas no puedan deformarse significativamente, propiedad que recibe el nombre de fragilidad. Debido a su naturaleza química, las cerámicas son inertes, es decir, no suelen reaccionar químicamente con el entorno que las rodea, lo que las hace resistentes a la corrosión y degradación. A continuación se ilustra el enlace iónico del cloruro de sodio, que es similar al del óxido de calcio y es característico de las cerámicas.



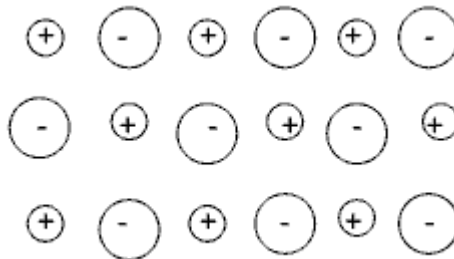
Se tiene un átomo de sodio y un átomo de cloro. Al sodio le sobra un electrón para lograr que sus niveles de energía estén completos, mientras que al cloro le falta un electrón para completar sus niveles de energía.

El sodio le regala su electrón adicional al cloro.



El sodio adquiere carga positiva (porque perdió un electrón) mientras que el cloro adquiere carga negativa (porque ganó un electrón). El ión sodio tiene un tamaño menor que el átomo de sodio mientras que el ión cloro es más grande que el átomo de cloro. La fuerza de atracción entre los iones con cargas opuestas produce el enlace iónico.

La gran mayoría de materiales cerámicos son cristalinos. La estructura cristalina de las cerámicas suele ser bastante compleja.

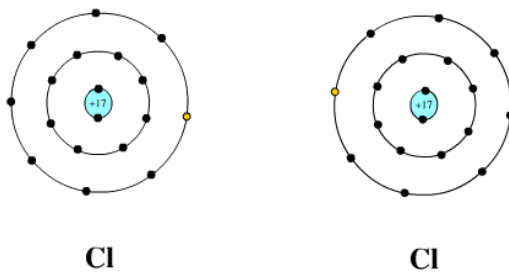


Esquema de la estructura de una cerámica

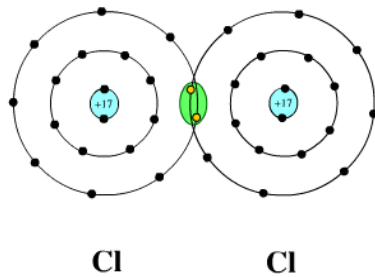
En los materiales cerámicos, el deslizamiento de las dislocaciones es muy difícil debido a que debe mantenerse la neutralidad eléctrica del material. Esto hace que los materiales cerámicos no posean ductilidad. Además, la difusión también es muy difícil por la misma razón, no teniendo ningún sentido tratarlos térmicamente para cambiar su microestructura.

NOTA: dislocación es una discontinuidad en la estructura de un cristal; y difusión es el movimiento de los átomos dentro de la estructura de un material.

2.3.3. **Polímeros.** La mayoría de estos materiales son compuestos orgánicos basados en elementos como el carbono, hidrógeno y otros elementos no metálicos. Su estructura consiste en moléculas largas. Los átomos que forman las moléculas están unidos entre sí por **enlaces covalentes** mientras que las moléculas están adheridas entre sí por enlaces débiles o por interferencia física. Normalmente los materiales polímeros tienen baja densidad, lo cual se traduce en un peso bajo. Los plásticos pertenecen a la familia de los polímeros. La mayoría de plásticos son flexibles y fáciles de deformar. A continuación se ilustra un enlace covalente característico de las moléculas de los materiales polímeros.

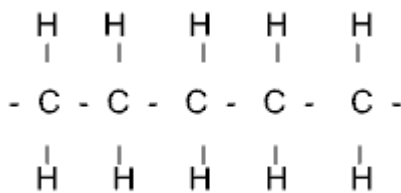


El enlace covalente se ilustra con dos átomos de cloro. Al átomo de cloro le falta un electrón para completar sus niveles de energía.



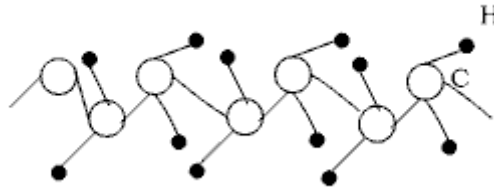
Cuando los átomos de cloro se acercan, comparten uno de los electrones que se encuentran en el nivel más alto de energía tratando de completar dicho nivel. Los electrones que son compartidos pertenecen a los dos átomos enlazados.

moléculas muy largas.



Esquema de una molécula de polietileno

Los átomos que forman la molécula están unidos entre sí por enlaces covalentes. Estos enlaces son direccionales lo que hace que la mayoría de moléculas tiendan a ser rizadas.



Los enlaces direccionales hacen que la molécula no sea recta, sino que tienda a rizarse

El material polímero está formado por una gran cantidad de moléculas de longitud diferente "enredadas" entre sí.



Las moléculas se enredan dándole cohesión al material

La cohesión y resistencia del material dependen de que tan "enredadas" estén sus moléculas. Generalmente entre más largas son las moléculas, mejor se enredan y el material posee mayor resistencia. Si las moléculas son cortas, no pueden enredarse bien y el material se deforma con facilidad.

Debido a que las moléculas normalmente están "enredadas", es muy difícil que los materiales polímeros formen estructuras cristalinas. La mayoría de polímeros son amorfos, es decir con átomos colocados de manera aleatoria, o a lo sumo semicristalinos.

2.3.4. Materiales compuestos. Son mezclas físicas de dos o más tipos diferentes de materiales (metales con cerámicas, metales con polímeros, cerámicas con polímeros, etc). Lo que se busca es obtener materiales con propiedades específicas proporcionadas por los componentes que lo forman. Por ejemplo, si se mezcla un polímero con fibras metálicas, es posible obtener un material compuesto que tenga bajo peso (aportado por el polímero) y que al mismo tiempo pueda conducir la electricidad (propiedad aportada por las fibras metálicas).

Estos materiales poseen múltiples fases. Sus propiedades dependen proporcionalmente de las propiedades y la cantidad de las fases que lo forman. Por esa razón, las fases se combinan en la cantidad adecuada para obtener las propiedades que se deseen.

Un ejemplo de un material compuesto sería mezclar hilos metálicos con un material polímero. Los hilos le proporcionan resistencia al material, mientras que el polímero le proporciona un peso bajo. Combinando la cantidad correcta de hilos y polímero, se puede obtener un material de buena resistencia y bajo peso.

Otro ejemplo es el concreto reforzado, en el que se mezcla una sustancia artificial, Cemento, con materiales pétreos; todos ellos sustancias iónicas de origen mineral; con acero de refuerzo que es un material metálico.

La mayoría de materiales compuestos está formado por dos fases. Una de ellas se llama la matriz. La matriz es la fase continua y generalmente se encuentra en mayor cantidad en el material. La otra fase se llama fase dispersa, y es rodeada por la matriz.. Por ejemplo en el concreto, la matriz es la pasta cementante y la fase dispersa son los materiales pétreos.

Las propiedades físicas del material dependen de las propiedades de cada fase, su cantidad relativa en el material y la geometría de la fase dispersa.

Los materiales compuestos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Reforzados con partículas
- Reforzados con fibras
- Estructurales

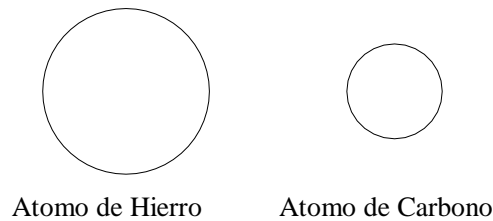
2.3.5. **Materiales semiconductores.** Su importancia se debe principalmente a que son la base de la electrónica. Tienen propiedades eléctricas intermedias entre los conductores (metales) y los aislantes (cerámicas). Estas propiedades eléctricas pueden controlarse en función de las impurezas (átomos diferentes) que se encuentren en el material.

2.4. Estructuras cristalinas. (<http://gis.uca.edu.sv/cursos/materiales/>)

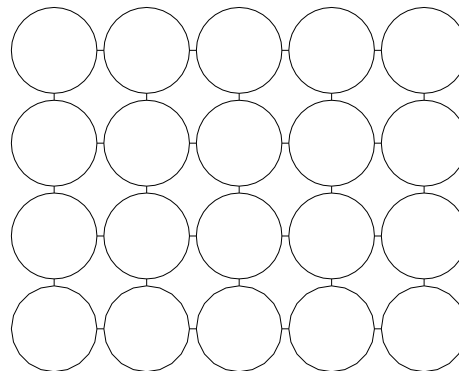
Para poder comprender las propiedades de los materiales, y poder por tanto seleccionar el material idóneo para una aplicación específica, se hace necesario comprender la estructura de los materiales. La comprensión de la estructura de los materiales se logra a través de modelos (hipótesis o planteamientos teóricos que han sido demostrados y validados con experimentos o simulaciones, y que se aceptan como verdaderos mientras no se pueda demostrar lo contrario).

El modelo sobre la estructura de los materiales que se acepta como válido en la actualidad consiste básicamente en lo siguiente:

- Los materiales están formados por átomos.
- Se considera que los átomos se comportan como esferas sólidas.
- Átomos de diferente naturaleza química se modelan como esferas de diferente tamaño. El tamaño de las esferas se define por su radio. Por ejemplo, por medio de experimentos se ha comprobado que los átomos de Hierro se comportan como esferas de 0.124 nm de radio ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), mientras que los átomos de Carbono se comportan como esferas de 0.071 nm de radio. Esas diferencias en el radio atómico se explican por la diferencia en el número de electrones que poseen los elementos químicos (el Hierro posee más electrones que el Carbono, por eso el átomo de Hierro es más grande que el de Carbono), así como por el hecho que los electrones se mueven en órbitas diferentes alrededor del núcleo atómico (recuerde que los electrones ocupan niveles de energía diferentes en el átomo).



Los átomos (las esferas) se enlazan entre sí para dar cohesión al material. Las características del enlace son diferentes dependiendo del tipo de material (metales: enlace metálico, cerámicas: enlace iónico, polímeros: enlace covalente entre los átomos que forman las moléculas). En nuestro modelo de esferas sólidas, esto es equivalente a que las esferas estén pegadas entre sí. Tanto el enlace metálico como el enlace iónico tienen naturaleza electrostática, lo cual significa que las fuerzas que mantienen unidos a los átomos son generadas por cargas eléctricas. Esto hace que el enlace que une a los átomos se comporte de manera elástica, es decir, al intentar separar los átomos el enlace que los une puede estirarse como si fuera un hule o resorte. Para nuestro modelo entonces, un material no es más que un conjunto de esferas sólidas unidas entre sí por medio de resortes.



Modelo de un material representando a los átomos como esferas sólidas. Las líneas que unen a las esferas representan los enlaces entre los átomos.

La forma como los átomos se agrupan entre sí no es aleatoria en todos los materiales. Se tienen tres posibilidades:

- Los átomos se unen unos a otros sin seguir un orden o patrón definido, se encuentran colocados al azar y la posición de cada átomo en el material es aleatoria. A los materiales que tienen esta característica se les llama **Materiales Amorfos**. El vidrio y la mayoría de plásticos son materiales amorfos.
- Los átomos se unen entre sí siguiendo un patrón definido en todo el material. El patrón de ordenamiento es repetitivo y regular, extendiéndose por todo el material. A los materiales que tienen esta característica se les llama **Materiales Cristalinos**. Los metales, los semiconductores y la mayoría de cerámicas son Materiales Cristalinos. A los conjuntos de átomos agrupados de manera regular y ordenada se les llama cristales.

- Algunos materiales pueden tener partes cristalinas (átomos ordenados siguiendo un patrón regular) y partes amorfas (átomos colocados de manera aleatoria). En este caso se considera que los átomos tienen un orden de corto alcance (en los materiales cristalinos el orden se define como de largo alcance). Dependiendo del tamaño de las zonas cristalinas, estos materiales pueden clasificarse como **Amorfos o Semicristalinos**. La mayoría de plásticos suelen ser Semicristalinos.

Microestructura.

Los materiales están formados por una gran cantidad de cristales y/o zonas amorfas. Un material cristalino puede estar formado por varios cristales los cuales difieren entre sí en sus propiedades físicas. Al conjunto de cristales (o zonas amorfas) que presentan las mismas características se les llama fases. La microestructura se define como el conjunto de fases que forman al material.

Las propiedades que posea un material dependen de su estructura. Por ejemplo, el módulo de elasticidad de un material depende de la forma como se comporta el enlace químico que une a sus átomos (estructura atómica). Ciertas propiedades magnéticas de los materiales dependen de la estructura cristalina. Por ejemplo, el hierro con cierta estructura cristalina es capaz de ser atraído por un imán (propiedad llamada magnetismo). El mismo hierro (los mismos átomos) pero con una estructura cristalina diferente (un material puede tener varias estructuras cristalinas totalmente distintas entre sí. A ese fenómeno se le llama polimorfismo) no puede ser atraído por un imán (no posee magnetismo). Las propiedades mecánicas dependen directamente de la microestructura que tenga el material.

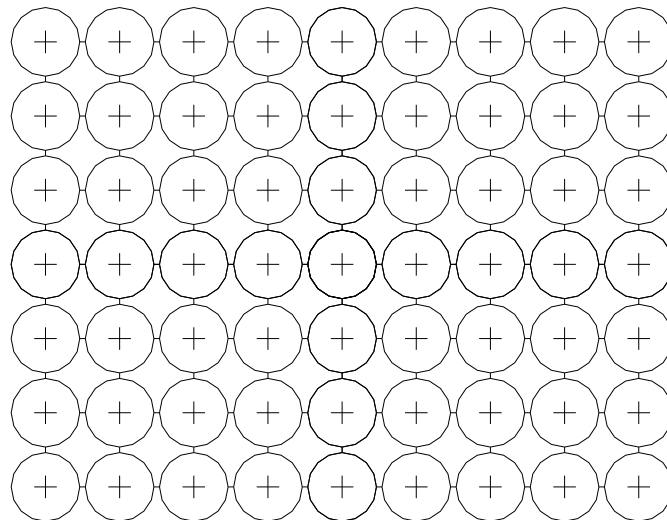
El hecho que un material sea cristalino, amorfo o semicristalino define algunas de sus propiedades. Por ejemplo, si un mismo material (los mismos átomos) tuviera la opción de ser cristalino o amorfo, se observaría que en estado cristalino la densidad del material (masa por unidad de volumen) sería mayor que en el estado amorfo. Esto se debe a que a causa del orden que siguen los átomos en el material cristalino, es posible colocar más átomos en el mismo volumen físico. Al existir más átomos existe más masa (la masa es proporcional al número de átomos) en el mismo volumen, por lo que la densidad resulta mayor que cuando el material es amorfo. En los plásticos es común encontrar materiales que tienen la misma naturaleza química (el Polietileno es un buen ejemplo) y dependiendo del método de fabricación pueden ser semicristalinos o amorfos. Comercialmente existe el Polietileno de Alta Densidad (HDPE) y el Polietileno de Baja Densidad (LDPE). El Polietileno de Alta densidad es semicristalino mientras que el de Baja Densidad es amorfo. Como su nombre lo indica, el HDPE tiene mayor densidad que el LDPE.

Algunas propiedades ópticas también dependen de si el material es cristalino o amorfo. Los metales (cristalinos) no dejan pasar la luz a través de ellos (son opacos), mientras que el vidrio (amorfo) y algunos plásticos (amorfos) permiten que la luz los atraviese (son traslúcidos). La explicación es la siguiente: en los materiales cristalinos el orden de los átomos hacen que éstos queden muy juntos entre sí, dejando muy pocos espacios entre ellos para que la luz pase a través de dichos espacios (recuerde que la luz es una onda electromagnética). Debido a que en los materiales amorfos la ubicación de los átomos es aleatoria, la probabilidad de

que queden espacios vacíos entre ellos por donde pueda pasar la luz es mayor, por lo que estos materiales son traslúcidos.

La estructura cristalina no es más que un concepto creado para describir la forma como están organizados los átomos en un material. Muchas de las propiedades de los materiales se explican a partir de la estructura cristalina que posea el material. Las estructuras cristalinas se estudian por medio de la difracción de rayos X. Los rayos X son un tipo de radiación similar a la de la luz visible, con la diferencia que su longitud de onda es menor. Esto permite a los rayos X pasar fácilmente entre los espacios que existen entre los átomos del material (la luz visible tiene una longitud de onda tal que no "cabe" en esos espacios para la mayoría de materiales). Al utilizar rayos X, parte de la radiación pasa entre los átomos y otra parte se refleja en ellos. Esto genera ciertos patrones de "sombras" que indican la forma como los átomos se encuentran ubicados en el material.

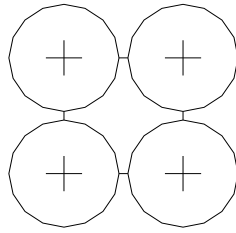
Suponga que es posible tomar una foto de los átomos colocados en el material. La foto de los átomos sería similar al esquema que se muestra a continuación:



Esquema de la estructura cristalina que se observaría en un material bidimensional.

En el centro de cada esfera (átomo) se ha colocado una cruz. Esas cruces representan el lugar geométrico que define las posiciones de cada uno de los átomos que forman al material. A esas posiciones se les llama puntos de red. Los puntos de red pueden estar ocupados por átomos o pueden estar vacíos.

No es necesario dibujar todos los átomos del material para representar su estructura cristalina. Para el ejemplo mostrado, es suficiente dibujar la posición de cuatro de los átomos para hacerse una idea muy clara de cómo están colocados el resto de átomos.



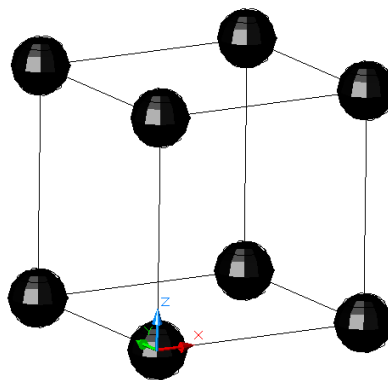
Cuatro puntos de red son suficientes para representar el ordenamiento de todos los átomos del material ilustrado

Al número más pequeño de puntos de red que representan el ordenamiento de todos los átomos del material se le llama celda unitaria. Para nuestro ejemplo, la celda unitaria está formada por cuatro puntos de red contenidos en el plano. Los materiales reales son tridimensionales, por lo que las celdas unitarias que representan su estructura cristalina también son tridimensionales. Se considera que la estructura cristalina de un material está formada por un conjunto de celdas unitarias apiladas entre sí.

Hasta el momento, solamente se han identificado catorce tipos diferentes de celdas unitarias agrupadas en siete sistemas cristalinos. Para los objetivos que se persiguen en este curso, bastará con estudiar el sistema cúbico y el sistema hexagonal.

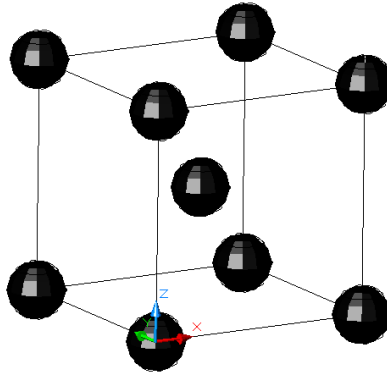
Tal como su nombre lo indica, la celda unitaria que define al sistema cúbico es un cubo. A la arista del cubo (longitud de sus lados) se le llama parámetro de red y es una propiedad de la celda unitaria. El parámetro de red se simboliza por a_0 , y se especifica a temperatura ambiente (el parámetro de red cambia con la temperatura. El valor del coeficiente de expansión térmica del material depende directamente de la forma como varía el parámetro de red con la temperatura). El parámetro de red puede medirse por medio de difracción de rayos X. La celda unitaria del sistema cúbico queda completamente definida por su parámetro de red. El sistema cúbico posee tres estructuras cristalinas.

- Estructura cúbica simple (CS). La celda unitaria es un cubo de arista a_0 con un punto de red definido en cada uno de sus vértices.



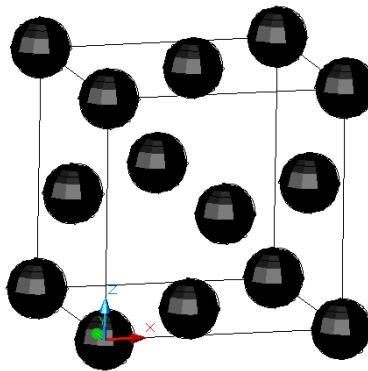
Celda unitaria de la estructura cúbica simple

- Estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC). La celda unitaria es un cubo de arista a_0 . Tiene un punto de red definido en cada uno de sus vértices y un punto de red definido en el centro geométrico del cubo (Ejm Hierro, Sodio)



Celda unitaria de la estructura cúbica centrada en el cuerpo

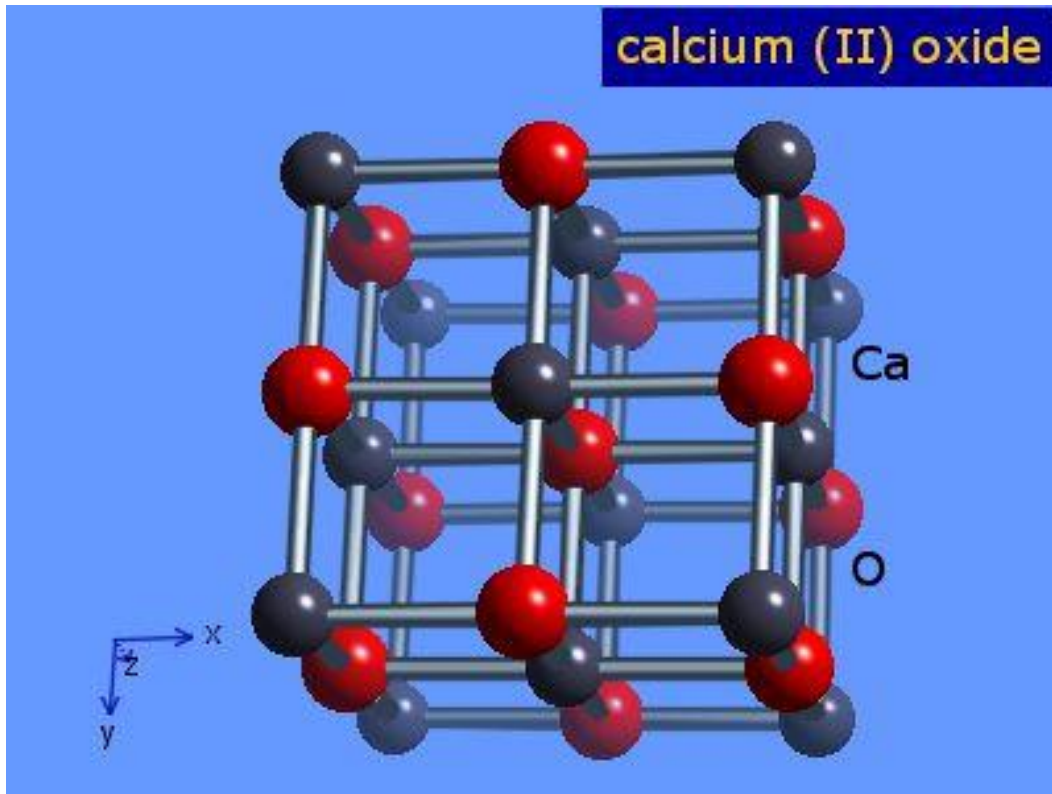
5. Estructura cúbica centrada en la cara (FCC). La celda unitaria es un cubo de arista a_0 . Tiene un punto de red definido en cada uno de sus vértices y un punto de red definido en el centro geométrico de cada una de sus caras. (Ejm. Calcio)



Celda unitaria de la estructura cúbica centrada en la cara

Las celdas unitarias tienen propiedades relevantes como: el número de átomos por celda, la relación entre el radio atómico (r) y el parámetro de red (a), el número de coordinación, el factor de empaquetamiento, la densidad teórica y los sitios intersticiales (ver <http://gis.uca.edu.sv/cursos/materiales/apuntes/Tema%2002.pdf>); pero también presentan defectos como: vacantes, átomos sustitucionales, átomos intersticiales, defectos lineales, y dislocaciones. Ver <http://gis.uca.edu.sv/cursos/materiales/apuntes/Tema%2002.pdf>.

Existen materiales que pueden tener más de una estructura cristalina. Si son elementos puros se les llama Materiales Alotrópicos. Si el material está formado por varios tipos de elementos químicos diferentes, se les llama Materiales Polimórficos. El ejemplo más común de un Material Alotrópico es el Hierro. Entre la temperatura ambiente y los 912°C , el hierro posee estructura BCC. Entre 912°C y 1394°C la estructura cristalina del hierro es FCC. Entre 1394°C y 1538°C la estructura del hierro regresa a BCC. Finalmente, a 1538°C el hierro pasa de sólido a líquido.



ESQUEMA DE UN CRISTAL DE CaO (óxido de Calcio). Los átomos de Calcio forman un sistema fcc y el oxígeno ocupa las posiciones vacantes.

2.5. Estados de la materia

2.5.1. Estados físicos de la materia.

<http://www.landsil.com/Fisica/PMateria.htm> (marzo 2006)

Los diferentes estados físicos, son las distintas maneras en que la materia se "agrega", a distintas presentaciones de un conjunto de átomos. Los estados de la materia son cinco: Sólido, Líquido, Gaseoso, Plasma y Condensado de Bose-Einstein.

Estado Sólido: los átomos se hallan dispuestos en un volumen pequeño, se sitúan adyacentes, uno al lado del otro, aunque no en contacto, formando generalmente una estructura.

Estado Líquido: los átomos se encuentran esparcidos en un volumen mayor, sin seguir ninguna estructura. La separación entre cada átomo es mayor que en el sólido.

Estado Gaseoso: los átomos ocupan un volumen mucho mayor. Es el estado en que los átomos están más separados.

Estado de Plasma: sus componentes no son átomos, sino partículas individuales y núcleos de átomos. Parece un gas, pero formado por iones (cationes -núcleos y protones con carga positiva-, neutrones sin carga y electrones -con carga negativa-). Cada componente del estado de plasma está cargada eléctricamente y el conjunto ocupa un gran volumen. El plasma es un estado que nos rodea, aunque lo experimentamos de forma indirecta. El plasma es un gas ionizado, esto quiere decir que es una especie de gas donde los átomos o moléculas que lo componen han perdido parte de sus electrones o todos ellos. Así, el plasma es un estado parecido al gas, pero compuesto por electrones, cationes (iones con carga positiva) y neutrones. En muchos casos, el estado de plasma se genera por combustión. El Sol situado en el centro de nuestro sistema solar está en estado de plasma, no es sólido, y los conocidos tubos fluorescentes contienen plasma en su interior (vapor de mercurio). Las luces de neón y las luces urbanas usan un principio similar. La ionosfera, que rodea la tierra a 70,80 km de la superficie terrestre, se encuentra también en estado de plasma. El viento solar, responsable de las auroras boreales, es un plasma también.

.

2.5.2. Diagramas de fase

<http://gis.uca.edu.sv/cursos/materiales/apuntes/Tema%2006.pdf>

Los materiales en estado sólido pueden estar formados por varias fases. La combinación de estas fases define muchas de las propiedades que tendrá el material. Por esa razón, se hace necesario tener una herramienta teórica que permita describir las fases que estarán presentes en el material. Esa herramienta teórica se llama Diagrama de fase.

Las fases sólidas en un material tienen las siguientes características:

- Los átomos que forman la fase tienen la misma estructura o arreglo atómico.
- La fase tiene la misma composición química en todo su volumen.
- Presenta las mismas propiedades físicas.
- Posee una interfase definida con su entorno.

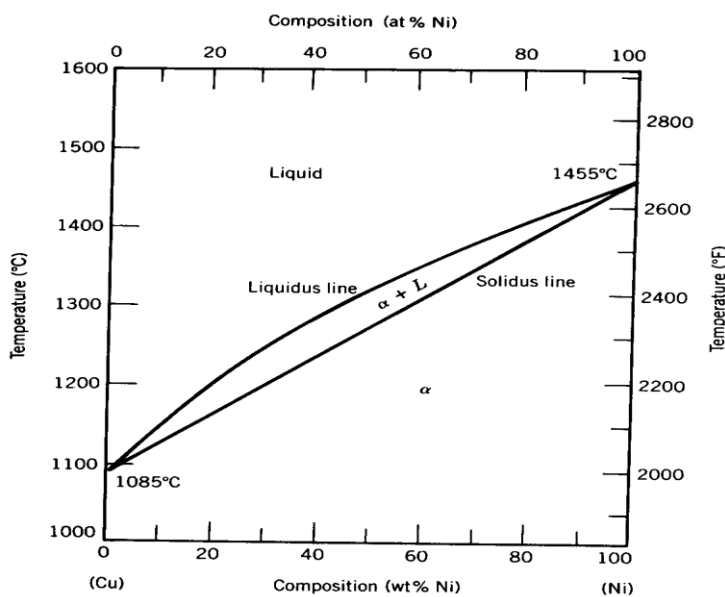
Los materiales puros solamente poseen una fase. Las aleaciones pueden poseer dos o más fases presentes al mismo tiempo. Una aleación se define como una solución en estado sólido. Una solución no es más que la mezcla de dos o más elementos químicos. Un diagrama de fases es un "mapa" que describe las fases presentes en un material en función de variables termodinámicas.

Cuando se mezclan dos o más elementos para formar una aleación, se pueden dar las siguientes situaciones:

- Existe solubilidad ilimitada produciéndose una fase sólida. El ejemplo típico de este caso es cuando se mezclan agua y alcohol. Para el caso de dos metales, el cobre y el níquel tienen solubilidad ilimitada, formándose una sola fase en estado sólido.
- Existe solubilidad limitada, lo cual significa que uno de los componentes puede disolverse hasta cierto límite en el otro. En este caso se producen dos

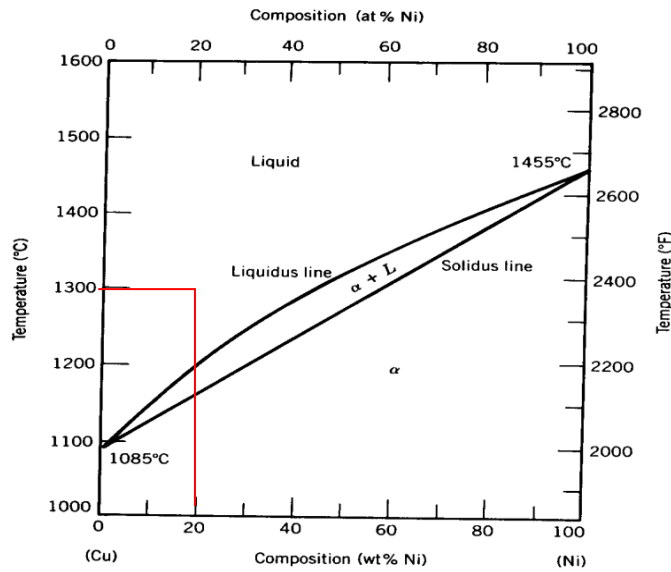
o más fases en la solución. El ejemplo típico es mezclar sal con agua. En ciertas cantidades, la sal se disuelve completamente en el agua, creando una fase (agua salada). Después de cierto límite, la sal no se disuelve más, generándose dos fases (agua salada + sal no disuelta). Para el caso de los metales, el cobre y el zinc tienen solubilidad limitada generándose varias fases en estado sólido.

Un diagrama de fase es un gráfico en cuyo eje vertical se mide la temperatura y en el eje horizontal se mide el porcentaje en peso de los componentes que forman la aleación. A continuación se muestra el diagrama de fase de la aleación Cobre-Níquel.

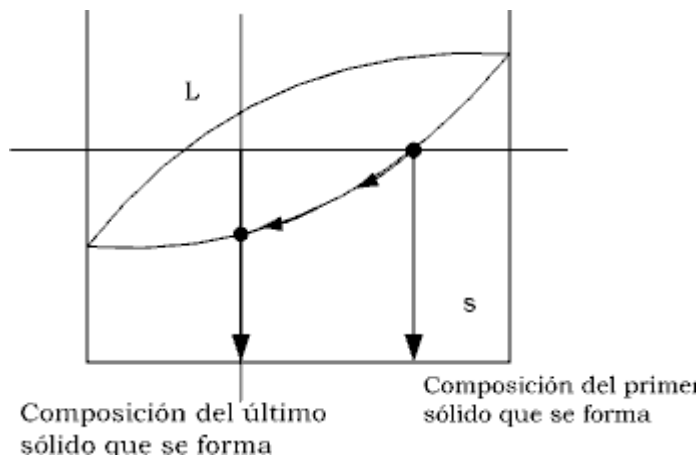


El diagrama de fases permite obtener la siguiente información:

- Las fases presentes en la aleación en función de la temperatura y la composición química. Suponga que una aleación cobre-níquel se encuentra a una temperatura de 1300° C. Suponga que la aleación está formada por 20% Ni y 80% Cu. En el diagrama se traza una línea horizontal a 1300°C y luego una línea vertical en 20% Ni. El punto donde se cruzan estas dos líneas representa a la aleación. El nombre de la zona donde queda ubicado el punto nos da el nombre de la fase o fases presentes. Para este ejemplo, la aleación se encuentra en fase líquida a esa temperatura y composición química.



Durante la solidificación de las aleaciones ocurre la segregación. Este fenómeno consiste en que la composición química del sólido que se forma primero es diferente a la del sólido que se forma por último. Esto es consecuencia del diagrama de fases.



La segregación causa que la composición química de la pieza sólida no sea uniforme. Esta falta de uniformidad causa que las propiedades mecánicas de la pieza tampoco sean uniformes. Para ciertas aplicaciones, esta falta de uniformidad en las propiedades mecánicas puede resultar inconveniente.

Este tema se profundizará en temas posteriores.

2.6. Propiedades mecánicas de los materiales (resistencia de los materiales).

2.6.1. Esfuerzos y deformaciones

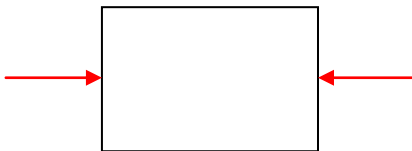
Las propiedades mecánicas describen como se comporta un material cuando se le aplican fuerzas externas.

Para propósitos de análisis, las fuerzas externas que se aplican sobre un material se clasifican así:

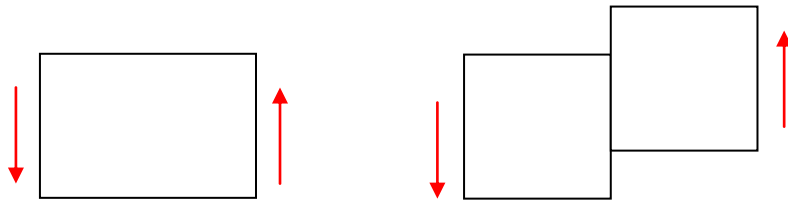
Fuerzas en tensión. La fuerza aplicada intenta estirar al material a lo largo de su línea de acción.



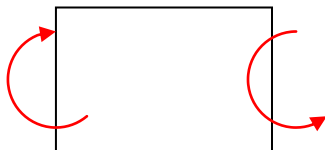
Fuerzas en compresión. La fuerza aplicada intenta comprimir o acortar al material a lo largo de su línea de acción.



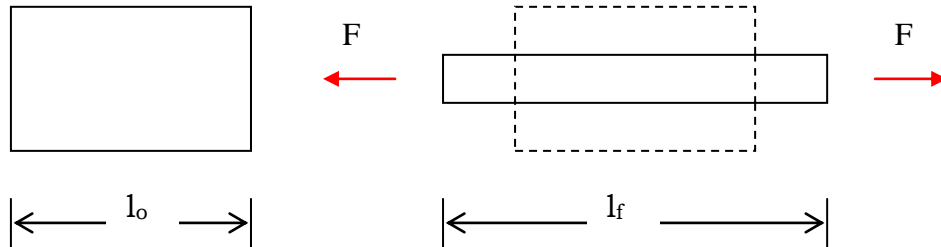
Fuerza en cortante. Las fuerzas se aplican de tal forma que intentan cortar o seccionar al material.



Fuerza en torsión. La fuerza externa aplicada intenta torcer al material. La fuerza externa recibe el nombre de torque o momento de torsión.



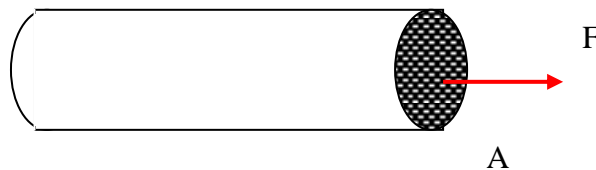
Cualquier fuerza externa que se aplique sobre un material causa su deformación. Para el caso de una fuerza en tensión, el material se alarga en el sentido de aplicación de la fuerza, y se acorta en la dirección transversal a la fuerza aplicada.



La deformación del material se define como el cambio en la longitud a lo largo de la línea de aplicación de la fuerza. En forma matemática:

$$\text{Deformación} = \Delta L = L_f - L_0$$

Para estudiar la reacción de los materiales a las fuerzas externas que se les aplican, se utiliza el concepto de esfuerzo.



$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza aplicada}}{\text{Area sobre la cual se aplica la fuerza}}$$

El esfuerzo tiene las mismas unidades de la presión, es decir, unidades de fuerza por unidad de área. En el sistema métrico, el esfuerzo se mide en Pascales (N/m^2). En el sistema Inglés, en psi (libras/pulg²). En aplicaciones de Ingeniería Civil, es muy común expresar el esfuerzo en unidades kg/cm^2 .

Existen dos tipos de esfuerzo para el caso de fuerzas aplicadas en tensión:

Esfuerzo (σ). Se define como la fuerza aplicada dividida entre el área transversal inicial del material (el área que tiene el material antes de aplicar la fuerza). El área transversal es el área perpendicular a la línea de acción de la fuerza.

$$\sigma = \frac{\text{Fuerza aplicada}}{\text{Area inicial del material}} = \frac{F}{A_0}$$

Esfuerzo verdadero (σ_v). Se define como la fuerza aplicada dividida entre el área transversal real o instantánea que posee el material mientras está actuando la fuerza.

$$\sigma_v = \frac{\text{Fuerza aplicada}}{\text{Area real o instantánea del material}} = \frac{F}{A}$$

Además, también se utiliza el concepto de deformación unitaria. Existen dos tipos de deformación unitaria:

Deformación unitaria de Ingeniería (ϵ) Se define como la deformación (ΔL) dividida entre la longitud inicial (L_0) del material.

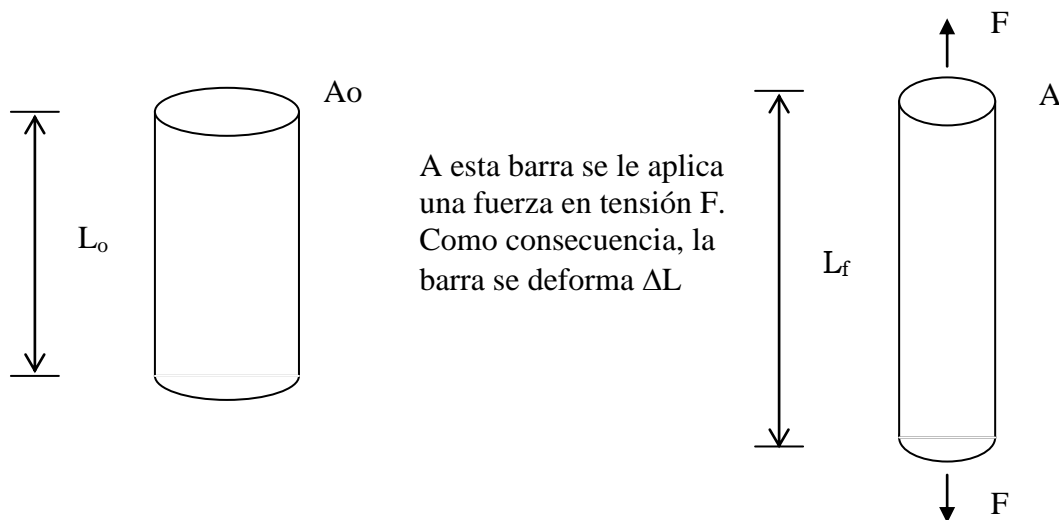
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Deformación unitaria verdadera (ϵ_v) Se define de la siguiente manera:

$$\epsilon_v = \ln\left(\frac{L_f}{L_0}\right)$$

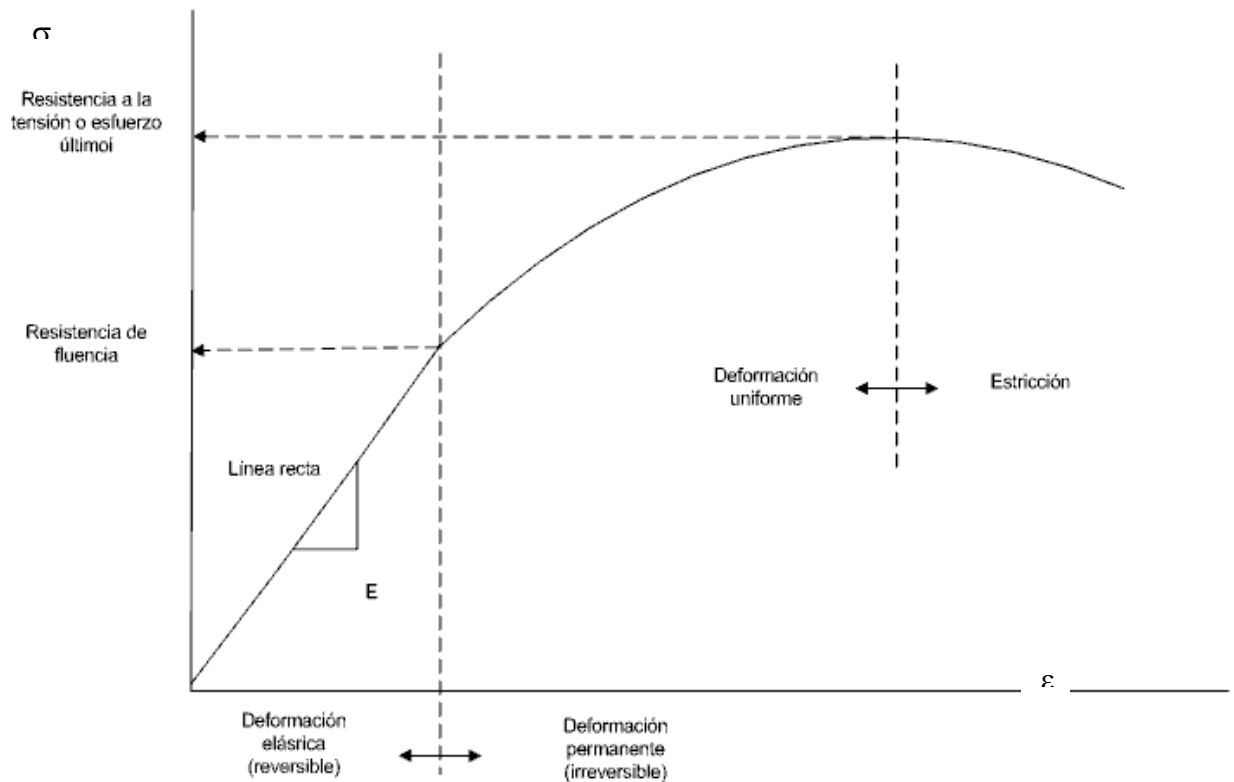
2.6.2. El diagrama esfuerzo-deformación

Para la construcción del diagrama de esfuerzo deformación se considerarán únicamente las fuerzas aplicadas en tensión. Suponga que se tiene una barra de área circular A_0 y longitud inicial L_0 .



Suponga que al inicio la fuerza aplicada es cero y luego su magnitud se incrementa gradualmente hasta que la barra se rompe. Suponga que cada cierto tiempo se grafica el esfuerzo aplicado contra la deformación unitaria de la barra.

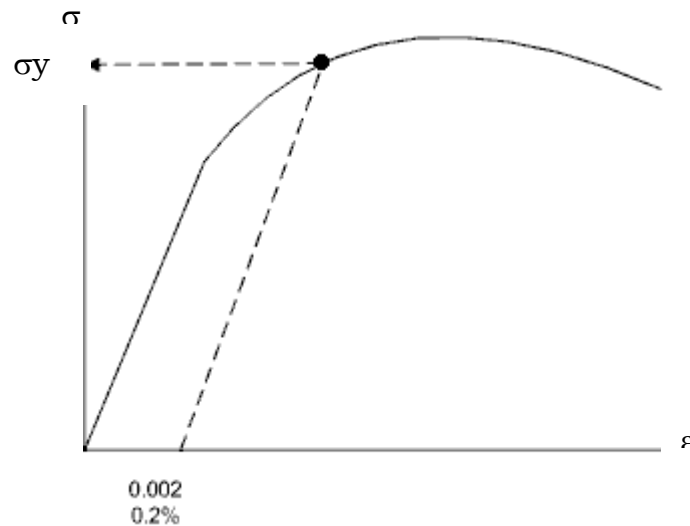
A esa gráfica se le llama curva esfuerzo – deformación unitaria, y es una propiedad mecánica del material del que está hecha la barra.



De la curva esfuerzo-deformación unitaria se obtienen varias propiedades mecánicas en tensión para el material.

Resistencia a la fluencia (σ_y)

Es el valor del esfuerzo que debe aplicarse sobre el material para iniciar su deformación permanente. Formalmente se define como el valor del esfuerzo que al ser aplicado al material produce una deformación permanente de 0.2%, tal como se ilustra en el esquema a continuación.



Módulo de elasticidad (E)

Es la pendiente de la línea recta que se forma en la zona elástica de la curva. Para la zona elástica se cumple que $\sigma = E\varepsilon$

El módulo de elasticidad es una medida de la rigidez del material. Si se tienen dos materiales (A y B), A es más rígido que B si se deforma elásticamente menos que B al aplicarles a ambos la misma fuerza. El material es más rígido entre mayor sea su módulo de elasticidad.

Módulo de resiliencia (E_r)

Es el valor numérico del área bajo la curva en la zona elástica. Representa la energía por unidad de volumen que el material absorbe cuando se deforma elásticamente.

Relación de Poisson (μ)

Es la relación entre la deformación unitaria longitudinal y la deformación unitaria lateral.

$$\mu = \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{longitudinal}}$$

Resistencia a la tensión o esfuerzo último (σ_u)

Es el valor máximo del esfuerzo de ingeniería que se puede aplicar sobre el material. Cuando el esfuerzo aplicado se iguala a la Resistencia a la tensión, se inicia la estricción y luego la fractura del material.

2.6.3. Ductilidad

La ductilidad es una medida de la cantidad de deformación plástica que puede darse en un material antes que éste se rompa. La ductilidad puede medirse de dos formas:

- El porcentaje de elongación. Se define de la siguiente manera:

$$\% \text{ de elongación} = (\%EL) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

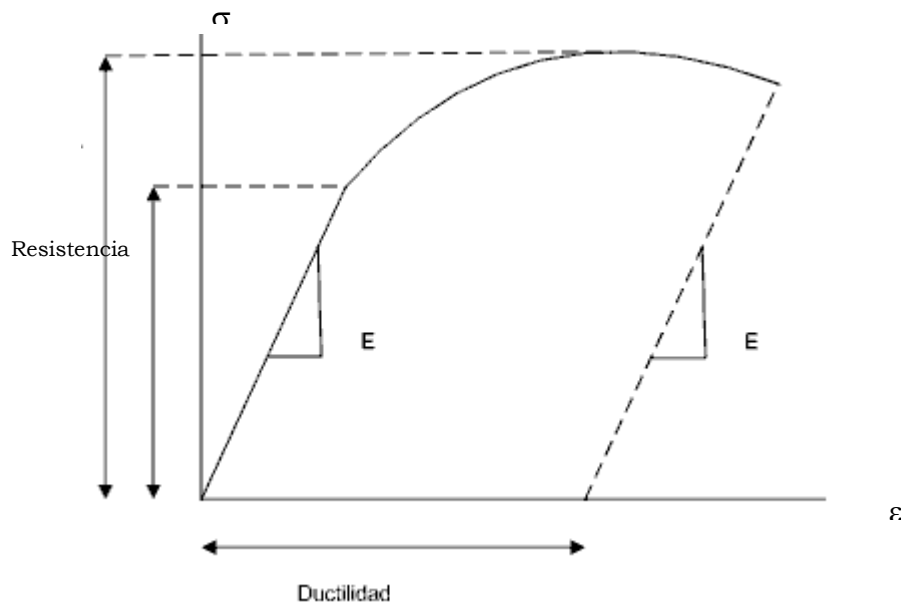
- El porcentaje de reducción de área, el cual se define de la siguiente manera:

$$\% \text{ de reducción de área} (\%AR) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

Una idea cualitativa de la ductilidad de un material puede obtenerse al ver la longitud de la curva esfuerzo – deformación unitaria en la dirección del eje ϵ .

2.6.4. Tenacidad

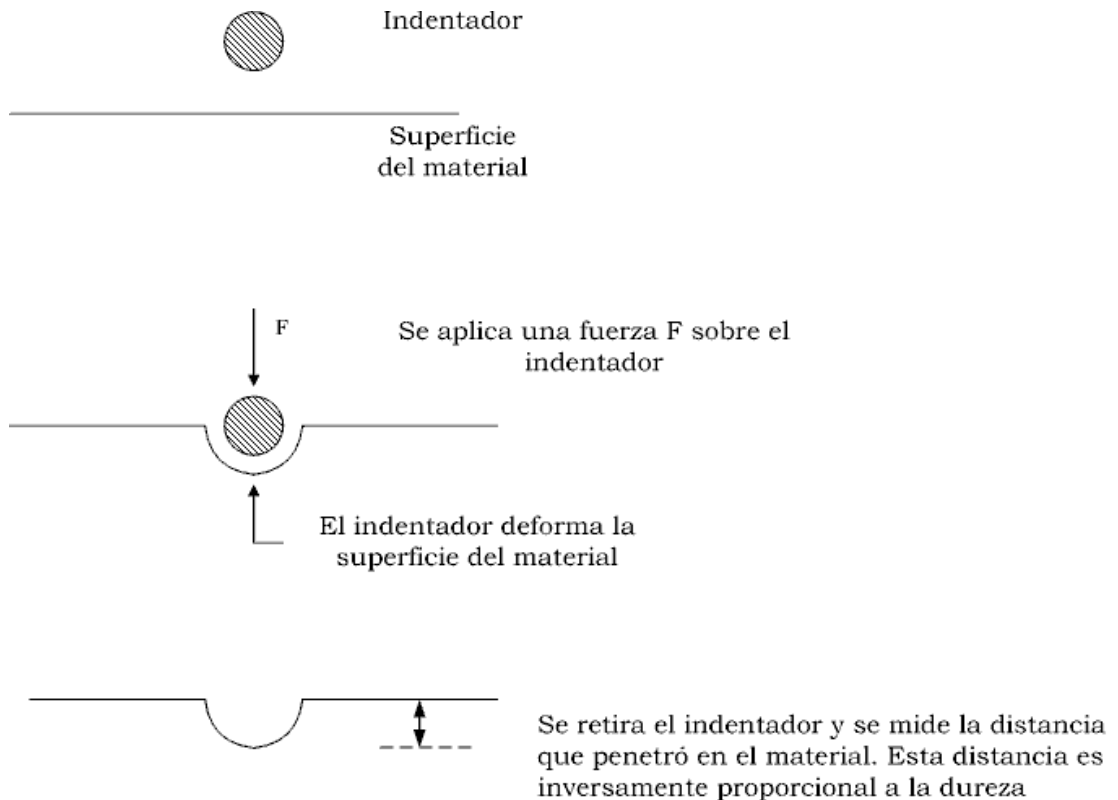
Es la energía por unidad de volumen que el material puede absorber antes de romperse. La tenacidad es numéricamente igual al área bajo la curva esfuerzo – deformación unitaria.



2.6.5. Dureza

La dureza mide la resistencia que un material ofrece cuando se intenta ser deformado plásticamente. Entre más duro es el material, más cuesta deformarlo plásticamente. La dificultad para deformar plásticamente al material se mide en función de la fuerza aplicada. Entre mayor tenga que ser la fuerza que se aplique para lograr la deformación plástica, más duro es el material.

Normalmente la dureza de un material se cuantifica por medio de una prueba de indentación. Este método de determinación de la dureza es muy común en los metales y se ilustra a continuación:



Si se tienen dos materiales a los que se les hace la indentación, y si la fuerza aplicada en el indentador es la misma para ambos materiales, a mayor penetración del indentador se tendrá una menor dureza del material.

Para medir la dureza, se puede variar tanto la geometría del indentador como la fuerza aplicada sobre éste. Cada combinación de indentador y fuerza aplicada genera una escala de dureza diferente (ver tabla de conversión de dureza). Existen equivalencias entre las distintas escalas de dureza que se pueden definir.

La dureza es una propiedad comparativa. Esto significa que sirve únicamente para comparar dos o más materiales entre sí. Si a manera de ejemplo se dice que el metal A es más duro que el metal B, esto significaría lo siguiente:

- Si los metales A y B rozan entre sí, el metal A se desgasta menos por fricción que el metal B.
- El metal A es más difícil de cortar que el metal B. El metal A se podría utilizar para cortar al metal B.
- El metal A es más difícil de unir por medio de soldadura que el metal B.
- El metal A es más difícil de deformar plásticamente que el metal B.

En el Anexo de este documento se presentan la Escla Mohs, el método Brinell y la dureza Rockwell.

2.6.6. Tenacidad a la Fractura.

La fractura se da cuando el material se rompe debido a la aplicación de una fuerza externa. Normalmente la fractura se asocia a la estricción y al esfuerzo de fractura de la curva esfuerzo – deformación unitaria, sin embargo es posible que un material se rompa a esfuerzos menores que su resistencia a la tensión, o incluso a esfuerzos menores que el esfuerzo de fluencia. Para comprender este fenómeno, se utilizan conceptos de una rama de la Ciencia de Materiales llamada Mecánica de Fractura.

La fractura de un material a esfuerzos bajos se debe a la presencia de fisuras, grietas o pequeños defectos en el material.

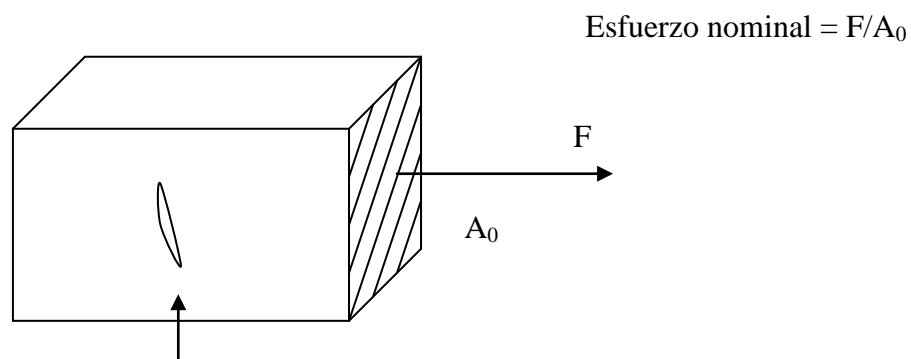


Un material sin defectos resiste cierta fuerza antes de romperse

El mismo material con una fisura o defecto se rompe a una fuerza menor que el material sin defectos

La mecánica de fractura estudia el comportamiento de los materiales con fisuras o defectos pequeños cuando se les aplican fuerzas.

La Tenacidad a la Fractura mide la capacidad del material con defectos para resistir las fuerzas que se apliquen sin causar su fractura.



En las cercanías del defecto, el esfuerzo efectivo sobre el material es mayor que el esfuerzo nominal. La fisura en el material tiene el efecto de intensificar o aumentar el esfuerzo real en el material.

Para medir cuánto puede resistir el material, se define el Factor de Intensidad del Esfuerzo, el cual se representa por la letra K. Este factor se define matemáticamente de la siguiente forma:

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}$$

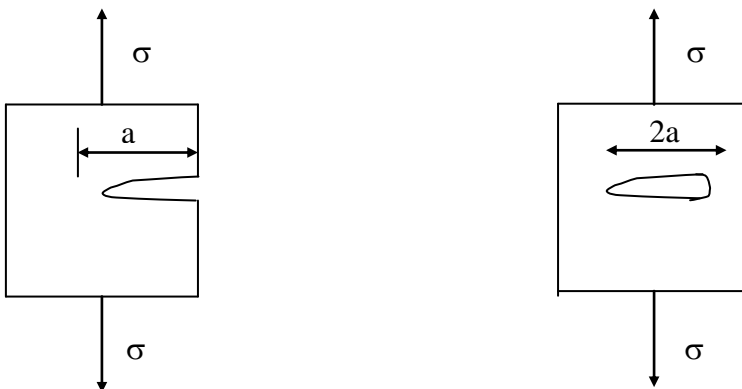
donde:

f = factor geométrico. Este es un número que depende de la fuerza aplicada y la geometría del defecto.

σ = esfuerzo nominal aplicado.

a = tamaño del defecto. Si el defecto es superficial, a es la longitud total del mismo. Si el defecto es interno, a es la mitad de la longitud del mismo.

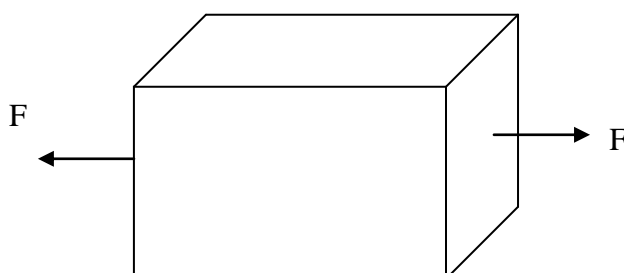
Esta definición de Factor de Intensidad del Esfuerzo sólo es válida para esfuerzos aplicados en tensión y que al mismo tiempo sean perpendiculares a la línea de acción del esfuerzo.



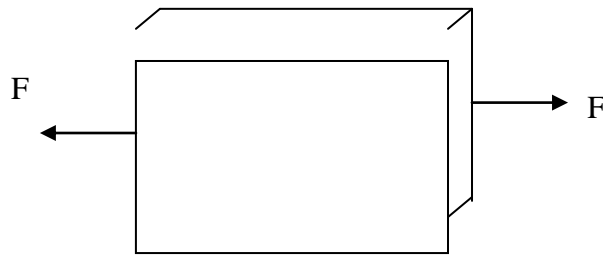
El valor de K que hace que el defecto comience a crecer y cause la fractura del material se llama intensidad del esfuerzo crítico o Tenacidad a la Fractura. Se representa por K_c

K_c = K requerido para que el defecto crezca y cause fractura.

El valor numérico de K_c depende del espesor del material, por lo que no se considera una propiedad mecánica.



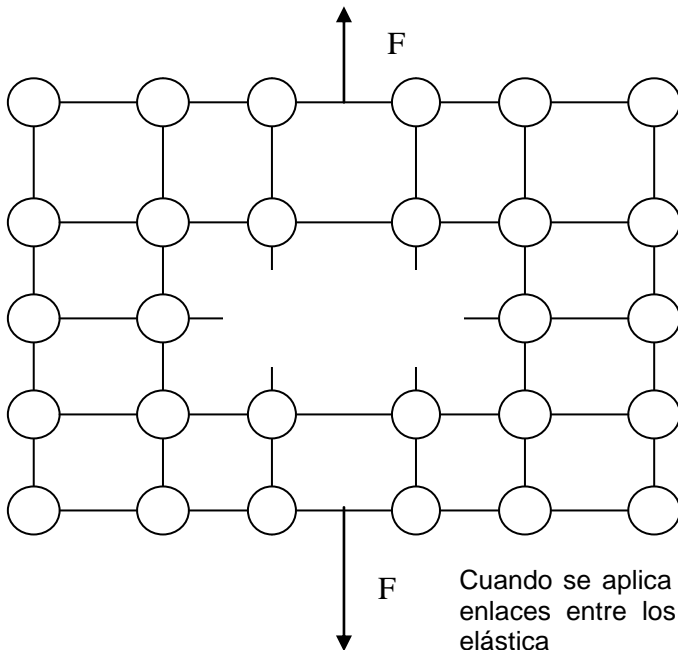
Si el espesor es grande, los esfuerzos, deformaciones y defectos son tridimensionales.



Si el espesor disminuye, las deformaciones (y defectos) quedan contenidos en un plano. Esta condición se le llama deformación plana.

El valor de K_{Ic} en deformación plana (espesores pequeños) es independiente del espesor del material y se considera una propiedad mecánica del mismo. A esta propiedad se le llama Tenacidad a la Fractura en deformación plana (K_{Ic})

El material se fractura debido a que uno de sus defectos crece espontáneamente, propagándose en el material.



Los átomos en la superficie del defecto (y del material) tienen más energía que el resto de átomos.

Cuando se aplica una fuerza, el material se deforma. Los enlaces entre los átomos se estiran guardando energía elástica

Para que el defecto crezca espontáneamente, deben suceder dos cosas:

- Deben romperse enlaces químicos.
- Debe formarse superficie nueva. Esta superficie nueva es la superficie de la fractura que se forma.

Cuando comienzan a romperse los enlaces (los cuales están estirados debido a la fuerza aplicada) se libera la energía elástica que está almacenada en ellos. En el mismo instante en que se rompen los enlaces, se forma la superficie de fractura.

Esta superficie debe absorber energía para poder ser formada. En el proceso de fractura, se dan dos interacciones de energía:

- Se libera la energía elástica almacenada en los enlaces.
- Se absorbe energía, la cual queda guardada en la superficie de fractura.

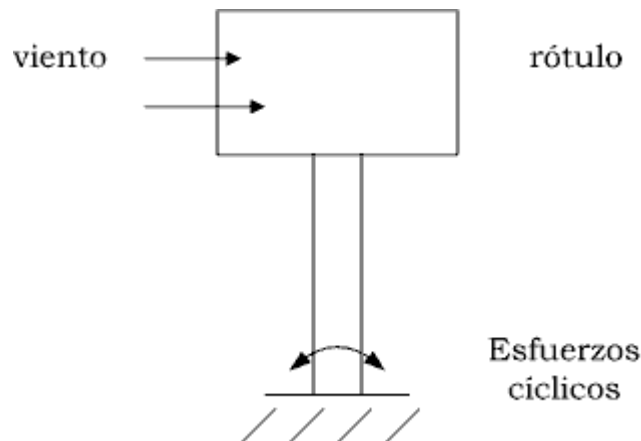
Ante esto, se tienen dos posibilidades:

1. La energía elástica liberada es menor que la energía requerida para formar la superficie de fractura. En este caso, la superficie no puede formarse por lo que la grieta no puede extenderse. El material, a pesar de tener defectos, es capaz de resistir la fuerza aplicada sin romperse.
2. La energía elástica liberada es mayor o igual que la energía requerida para crear la superficie de fractura. En este caso, la grieta se extiende espontáneamente causando la fractura del material.

2.6.7. Fatiga.

Es la falla por fractura del material que se da cuando se aplican esfuerzos que cambian con el tiempo.

Bajo condiciones estáticas (esfuerzo constante) esfuerzos aplicados menores que la Resistencia a la Tensión no harían que el material falle. Sin embargo, si los esfuerzos varían en el tiempo, como por ejemplo el caso de un rótulo sujeto a las fuerzas del viento, la repetición sucesiva de esfuerzos puede causar la falla por fatiga.



La falla por fatiga se da en tres etapas:

1. Se genera una grieta muy pequeña en el material. Esta grieta también puede ser un defecto pre-existente originado en la fabricación del mismo.
2. La grieta crece una longitud pequeña cada vez que se aplica un ciclo del esfuerzo.
3. Cuando la grieta ha crecido demasiado, la pieza se debilita y se fractura de manera súbita.

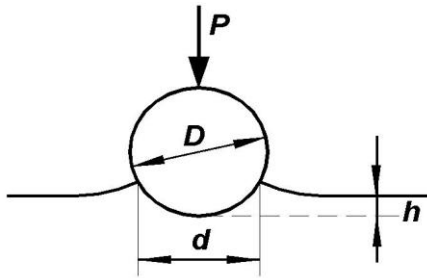
ANEXOS: MEDICION DE LA DUREZA DE LOS MATERIALES

La escala de Mohs (http://es.wikipedia.org/wiki/Escala_de_Mohs, marzo 2006) es utilizada para medir la dureza de una sustancia. Fue propuesta por Friedrich Mohs y se basa en el principio que una sustancia dura puede rayar una sustancia más blanda pero no es posible al revés.

Mohs, un geólogo, escogió 10 minerales a los que atribuyó un determinado grado en su escala empezando con el talco que recibió el número 1 y terminando con el diamante al que se asignó el número 10. La tabla completa es la que se indica:

Dureza	Mineral	Composición química
1	Talco, (se puede rayar fácilmente con la uña)	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
2	Yeso, (se puede rayar con la uña con más dificultad)	CaSO ₄ ·2H ₂ O
3	Calcita, (se puede rayar con una moneda de cobre)	CaCO ₃
4	Fluorita, (se puede rayar con un cuchillo)	CaF ₂
5	Apatito, (se puede rayar difícilmente con un cuchillo)	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH-,Cl-,F-)
6	Ortoclasa, (se puede rayar con una lija de acero)	KAlSi ₃ O ₈
7	Cuarzo, (raya el vidrio)	SiO ₂
8	Topacio,	Al ₂ SiO ₄ (OH-,F-) ₂
9	Corindón, (zafiros y rubíes son formas de corindón)	Al ₂ O ₃
10	Diamante, (el mineral natural más duro)	C

La dureza Brinell <http://www.utp.edu.co/~gcalles/Contenidos/DurezaHB.htm> (marzo 2006), es un método de ensayo por indentación por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza una bola endurecida, bajo condiciones específicas, contra la superficie del material a ensayar y se mide el diámetro de la impresión resultante luego de remover la carga.



Ateniéndonos a la definición, el número de dureza Brinell (como esfuerzo de contacto), es la relación de la carga \$P\$ que efectúa el indentador esférico de diámetro \$D\$, al área de la superficie de la huella:

$$HB = \frac{P}{A} = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{D^2} \left[\frac{\frac{2}{\pi}}{1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}} \right];$$

La deducción de la fórmula de cálculo del área \$A\$ del casquete esférico, puede verse aquí.

En la práctica se usa la siguiente fórmula de trabajo:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

El método estándar como tal se realiza bajo las siguientes condiciones:

Diámetro de la bola (D) :	10 mm
Carga (P):	3000 kgf
Duración de la carga (t):	10 ... 15 s

En el caso de realizarse el ensayo bajo estas condiciones el número de dureza Brinell se denota sin ningún sufijo. Ejemplo:

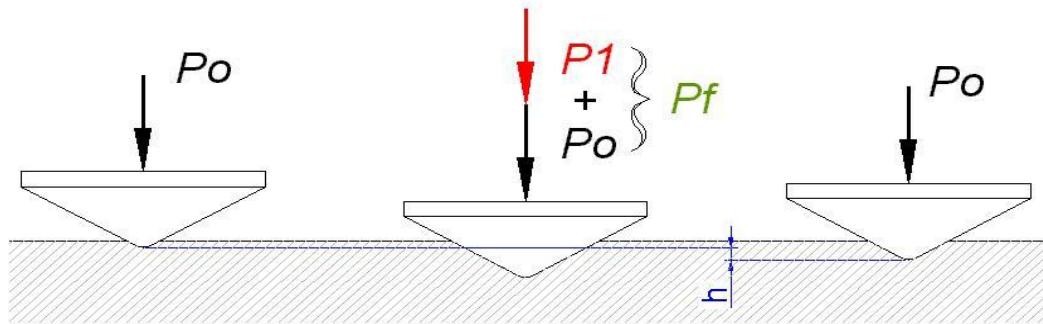
220 HB

Esta notación indica una dureza Brinell de 220 bajo las condiciones estándar arriba nombradas. (10/3000/15).

El método de Rockwell

<http://www.utp.edu.co/~gcalles/Contenidos/DurezaHR.htm> marzo 2006) aunque es un método de indentación no pretende de manera directa medir la dureza a través de la determinación directa de la magnitud de los esfuerzos de contacto, sino que la define como un número arbitrario, inversamente proporcional a la penetración del indentador.

El esquema de determinación de la dureza según Rockwell se expone en la siguiente figura



Esquema de medición de la dureza Rockwell

Al comienzo el indentador penetra un poco en la superficie de la muestra bajo la acción de la carga previa P_0 , la cual se mantiene hasta el final del ensayo. Esto garantiza una mayor exactitud del ensayo ya que excluye la influencia de las vibraciones y de las irregularidades de la delgada capa superficial. Después se expone la probeta a la acción de la carga total $P_f = P_0 + P_1$, y la profundidad de penetración aumenta. Luego de retirada la carga principal P_1 , en el sistema probeta-indentador ocurre una recuperación elástica, ya que sobre el actúa sólo la carga previa P_0 , siendo posible la medición de la profundidad de penetración h , la cual determina el número de dureza Rockwell (HR).

La dureza Rockwell se define como un método de ensayo por indentación por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza un indentador cónico-esferoidal de diamante (penetrador de diamante), o una bola de acero endurecido, bajo condiciones específicas contra la superficie del material a ser ensayado, en dos operaciones, y se mide la profundidad permanente de la impresión bajo condiciones específicas de carga.

Entre el número de Rockwell y la profundidad de la impronta h existe la siguiente dependencia:

$$HR = 100 - \frac{h}{0,002}$$

Para el cono de diamante

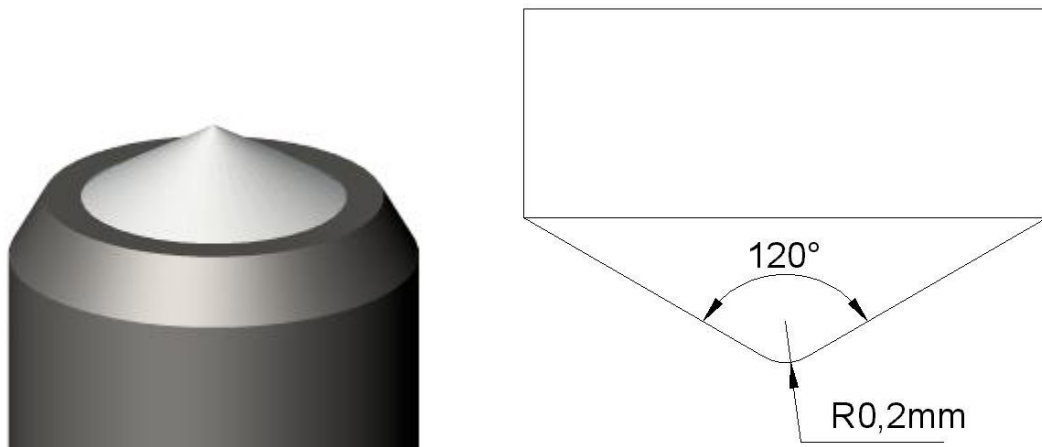
$$HR = 130 - \frac{h}{0,002}$$

Para las bolas de acero

De estas fórmulas se deduce que cada unidad de dureza Rockwell corresponde a una penetración de 0,002 mm y que el valor de dichas unidades debe ser restado de cierto "tope" para que haya coherencia: a menor profundidad de penetración mayor será el número de Rockwell y viceversa.

En la práctica no hay necesidad de usar estas fórmulas, ya que los indicadores de las máquinas de Rockwell de manera automática realizan estas operaciones mostrando directamente el número de dureza en sus diales. Esta característica granjeó para este método un gran popularidad.

El estándar define las características geométricas de los indentadores. Para el penetrador cónico esferoidal se muestran en la figura:



Indentador cónico esferoidal de Rockwell

Las bolas son similares a las del método Brinell y tienen los siguientes diámetros: \varnothing 1/16"; \varnothing 1/8"; \varnothing 1/4"; \varnothing 1/2".

Las cargas a aplicar pueden ser:

carga previa P0	[kgf]	10		
carga principal P1	[kgf]	50	90	140
carga total Pf	[kgf]	60	100	150

A partir de las combinaciones posibles de distintos indentadores y cargas, el estándar ASTM E18 define 15 escalas diferentes de durezas Rockwell. Se muestra la tabla que las define, tomada directamente de dicho estándar. En esta tabla se muestra también la aplicabilidad de cada tipo de prueba.

Scale Symbol	Penetrator	Major Load, kgf	Dial Figures	T
B	1/16-in. (1.588-mm) ball	100	red	Copper
C	diamond	150	black	loys, n Steel, ha iron, t and ot
A	diamond	60	black	Cemente low ca
D	diamond	100	black	Thin ste and pe
E	1/8-in. (3.175-mm) ball	100	red	Cast iron loys, b
F	1/16-in. (1.588-mm) ball	60	red	Annealed metals
G	1/16-in. (1.588-mm) ball	150	red	Malleabl cupro- to avo
H	1/8-in. (3.175-mm) ball	60	red	Aluminu
K	1/8-in. (3.175-mm) ball	150	red	} Bearing materi est loa
L	1/4-in. (6.350-mm) ball	60	red	
M	1/4-in. (6.350-mm) ball	100	red	
P	1/4-in. (6.350-mm) ball	150	red	
R	1/2-in. (12.70-mm) ball	60	red	
S	1/2-in. (12.70-mm) ball	100	red	
V	1/2-in. (12.70-mm) ball	150	red	

Escalas de dureza Rockwell (Tomado de ASTM E 18 - 79)

Nota: La máquina de nuestro Laboratorio difiere de lo consignado en esta tabla, al estar marcada en color rojo la escala de aplicación con diamante y en negro la escala de aplicación con bolas de acero

En la práctica las escalas más difundidas son la C y B.

El número de dureza Rockwell se denota como HR seguido de la letra mayúscula de la escala así:

64 HRC

Esta notación indica una dureza Rockwell de 64 unidades en la escala C (diamante, carga total 150 kgf)