**ASIGNATURA: CIENCIA DE LOS MATERIALES**

**AÑO: 3ero CURSO DIURNO INGENIERÍA MECÁNICA.**

**PLAN DE ESTUDIO: E**

**CONTENIDOS BÁSICOS**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**TEMA I: Estructura Cristalina de los metales. Propiedades mecánicas y mecanismos de endurecimiento de los metales y sus aleaciones.**

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**TEMÁTICA 1. 1. Clasificación de los grupos de materiales. Estructura cristalina de los metales. Redes cristalinas típicas de los metales. Imperfecciones cristalinas. Solidificación y Difusión. Estructura real de los cristales metálicos. Anisotropía de las propiedades de los cristales. Propiedades que caracterizan cada grupo de materiales. Criterios de selección y diseño para su uso.**

**OBJETIVOS:**

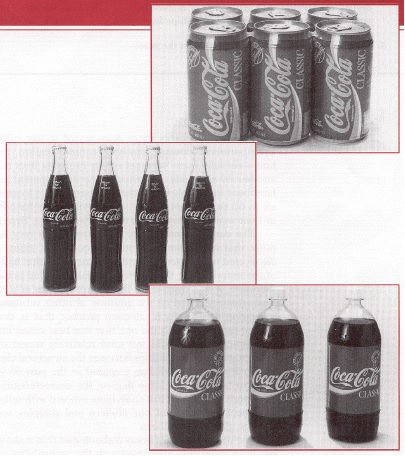
**2**

1. Clasificar los materiales empleados en la construcción de maquinaria, estableciendo la relación que existe entre estructura, composición química y propiedades.
2. Identificar las principales redes cristalinas típicas de los materiales así como sus principales parámetros.
3. Establecer criterios de selección de materiales metálicos.
4. Definir qué se entiende por difusión así como diferenciar los diferentes tipos de difusión presentes en los metales.
5. Establecer las leyes más generales que rigen los procesos de difusión.
6. Caracterizar los procesos tecnológicos más importantes basados en el empleo de las leyes de la difusión.

**DESARROLLO**

* 1. **Clasificación de los grupos de materiales.**

En la actualidad los materiales se diseñan de acuerdo a una aplicación específica, esto es gracias a la gran cantidad de información disponible y a las herramientas que permiten predecir el comportamiento mecánico de un material.



Envases de Coca Cola (Callister, 2000)

**Tipos de Materiales.**

1. Metales.
2. Cerámicos.
3. Polímeros.
4. Semiconductores.
5. Vidrios.
6. Cemento y Concreto.
7. Materiales compuestos (Compositos).

**METALES**:

1. Ferrosos (Aceros y Fundiciones).
2. Ferrosos (Bronces, Latones, Inconel etc.)

**CERÁMICOS:**

1. Oxidos (Al2O3, ZrO).
2. Nitruros (Si3N4).
3. Carburos (WC, TiC, Fe3C).
4. Compuestos Complejos.

**VIDRIOS (BASE SILICE Y SILICATOS)**:

1. Aplicaciones ópticas Resistentes al calor

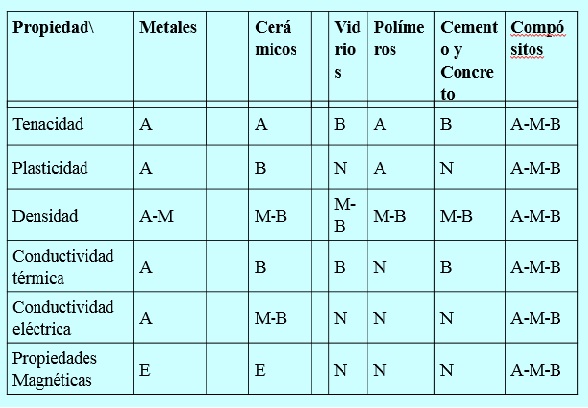
**POLÍMEROS/RESINAS:**

1. Termoestables: redes poliméricas con enlaces cruzados.
2. Termoplásticos: enredamiento de moléculas de peso molecular alto.

**MATERIALES COMPUESTOS:**

1. Metal + Cerámico = Compuestos de matriz metálica (MMC) o matriz cerámica (CERMET)
2. Cerámico 1 + Cerámico 2 = Composito cerámico o Cerámico reforzado (Fibras, hojuelas o partículas).
3. Vidrio + Fibra de cerámico = Vidrio cerámico
4. Fibra de Carbon + Resina (Termofija)
5. Fibra de Vidrio + Resina (Termofija)
6. Fibra de Polímero + Resina (Termofija)
   1. **Propiedades que caracterizan cada grupo de materiales. Criterios de selección y diseño para su uso.**





**Relación entre estructura, propiedades y procesamiento**

El aspecto fundamental que debe tomarse cuando se requiere producir un componente con una geometría y propiedades adecuadas, es el desempeño que éste tendría durante su vida útil. Para poder hacer la mejor selección y diseño, debemos tomar en cuenta la compleja relación entre la estructura interna del material, su procesamiento y sus propiedades finales. Cuando alguno de los tres aspectos de esta relación cambia los otros dos se ven afectados. Por lo que resulta ventajoso poder determinar la relación que existe entre estos tres aspectos a fin de obtener el producto requerido.

El procesamiento de un material por lo general afecta la estructura de éste. Por ejemplo, una barra de cobre o acero fabricada por fundición tendrá una microestructura diferente a la de una barra obtenida por conformado mecánico. La forma, tamaño y orientación de los granos puede ser diferente. En las fundiciones se pueden observar huecos: (rechupes) debidos a la contracción del metal durante la solidificación, burbujas de gas; partículas no metálicas (inclusiones) y granos columnares o estructuras dendríticas desarrolladas en la pared del molde hacia el centro de la pieza.



En el material conformado mecánicamente las partículas no metálicas se deforman en la dirección del flujo al igual que los granos, la estructura cristalina sufre deformaciones (texturizado). La estructura y propiedades originales determinan la manera de procesar el material. Las piezas de fundición que contengan huecos pueden sufrir agrietamiento durante un conformado mecánico posterior. Las aleaciones que han sido endurecidas por alteraciones de la estructura cristalina se vuelven "fragiles" y pueden fracturarse durante un conformado posterior.

En el caso de los polímeros, sus propiedades mecánicas están determinadas por su estructura química y peso molecular. Propiedades como la resistencia a la tensión, módulo de Young, dureza y facilidad de proceso requieren un valor de peso molecular mínimo para alcanzar el óptimo. Si bien la resistencia mecánica aumenta con el peso molecular, la facilidad de procesamiento disminuye. Las variables más importantes que determinan el estado físico de un polímero son la magnitud y naturaleza de las restricciones al movimiento de sus cadenas moleculares, principalmente en el estado amorfo; en cambio cuando existe cierto grado de cristalinidad el material se endurece, aumentando su punto de fusión y propiedades mecánicas. Los polímeros clasificados como termoestables o termofijos no pueden deformarse plásticamente, mientras que los termoplásticos son fácilmente deformables.



El procesamiento de los materiales genera la forma deseada del componente a partir de un material uniforme.

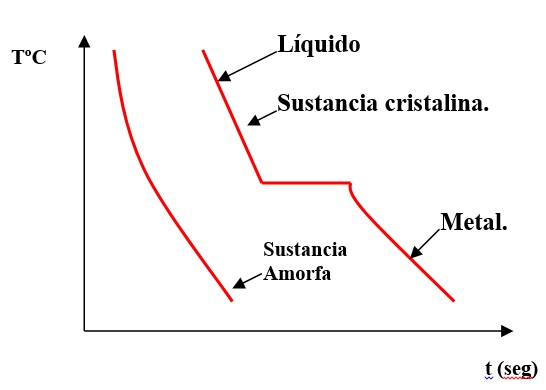




* 1. **Estructura cristalina de los materiales. Redes típicas.**

De acuerdo a su naturaleza los cuerpos pueden ser amorfos a cristalinos. En los cuerpos amorfos el paso del estado de agregación líquido al sólido es gradual. Por ejemplo el vidrio sólido, si se calienta va ablandándose y pasa poco a poco al estado líquido.

La transición inversa será completamente suave, el vidrio líquido en la medida que baja la temperatura se va haciendo cada vez más espeso hasta que finalmente se “solidifica”. En el vidrio no existe una temperatura de transición del estado líquido al “sólido”, tampoco existen las temperaturas (puntos) de cambio brusco de propiedades.



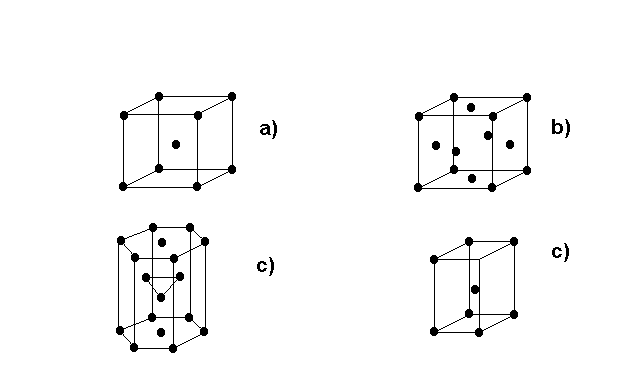
El vidrio sólido transparente ordinario es un líquido espeso subenfriado. Este estado es amorfo, y se caracteriza por la carencia de una temperatura de fusión determinada, y por la inexistencia de una disposición regular de los átomos en forma de red cristalina.

Ahora bien los metales no son cuerpos amorfos sino cristalinos o sea sus átomos están dispuestos en un espacio de acuerdo a un orden geométrico determinado que se repite con determinada regularidad formando una red cristalina. Esta red podemos figurárnosla en forma de una red espacial en cuyos nodos se encuentran los átomos unidos por líneas imaginarias, en otras palabras, **es el conjunto de planos cristalográficos situados paralelamente y a una misma distancia.**

**Retículo cristalino de los materiales.**

**Celdilla elemental:** Son el conjunto menor de átomos que conservan las mismas propiedades geométricas de la red y que al repetirse muchas veces en el espacio constituirán la red cristalina.

Existen 14 tipos de celdillas elementales. De ellas solo se encontrarán 4 de ellas con sus variantes en los metales y aleaciones metálicas. Estas son:

1. **Red cúbica centrada en el cuerpo (c.c):** La red representa un cuba cuyo parámetro es **a**. Los átomos están dispuestos en los vértices y en el centro del cubo. Tienen poca densidad de compactación, es decir los átomos ocupan un 68% del volumen de la red, mientras que en la (c.c.c) y la (h.c) ocupan un 74% del volumen. Su número de coordinación es 8. Ej: Fe (α), Mo, Na, etc.
2. **Red cúbica centrada en las caras:** La red tiene forma de cubo de parámetro con 8 átomos en los vértices del cubo y 6 en los centros de cada una de las caras. La densidad de compactación es del 74%. El índice de coordinación es 12. Ej: Fe (γ), Ni, Co, Cu, Al, Ti, etc.
3. **Red hexagonal compacta (hc).** La red tiene forma de prisma recto cuya base es un hexaedro. Tiene dos parámetros, los lados de la base del prisma **a** y su altura **c**. Doce átomos están dispuestos en los vértices de la red, 2 átomos en el centro de la base y 3 átomos en el interior de la red. La densidad de computación es 74% y el índice de coordinación es 12. Ej: Ti, Co, Cd, Mg.
4. **Red Tetragonal centrada en el cuerpo:** Tiene forma de prisma recto de base centrada. Los átomos están dispuesto de igual forma que en la (c.c). presenta dos parámetros, el lado de la base **a** y la altura **c**. La relación **c/a** recibe el nombre de grado de tetragonalidad. El índice de coordinación es igual a 8.

**Tipos de redes cristalinas presentes en los metales: a) red cúbica centrada en el cuerpo. b) red cúbica centrada en las caras. c) red hexagonal compacta. d) red tetragonal.**

**Características de la red cristalina.**

* **Parámetros de la red:** Caracteriza las dimensiones de la red en Angstrom. A través de la difracción de Rayos X, se puede calcular el parámetro de una red con una exactitud de una cien milésima de Angstrom (1Å = 10-9mm).
* **Índice de coordinación:** Es el número de átomos que se encuentran más próximos y equidistantes de un átomo dado.
* **Número de átomos correspondientes a una celdilla elemental:** En la red cúbica centrada en el cuerpo los átomos de los vértices pertenecen a 8 celdillas. Por consiguiente cada átomo aporta a una celdilla 1/8 de su volumen. El átomo central pertenece a la celdilla, por lo tanto a una celdilla elemental le corresponde:

**(1/8 x 8) + 1 = 2 átomos**

En la red cúbica centrada en las caras al pertenecer los átomos de las caras a dos celdillas le ecuación quedaría:

**(1/8 x 8) + (1/2 x 6) = 4 átomos**

* **Densidad de compactación:** Es el volumen que pueden ocupar los átomos en la red cristalina. Admitiendo que el átomo tiene forma de esfera, pueda calcularse su valor.
* **Estructura real de los cristales metálicos.**

Los cristales de un metal tienen por lo general pequeñas dimensiones. Por esto los objetos metálicos están formados por un número muy grande de cristales. Esta estructura recibe el nombre de **policristalina.**

En un agregado policristalino los cristales aislados no tienen la posibilidad de tener forma regular. Estos cristales de forma irregular del agregado policristalino reciben el nombre de **grano.**

La orientación de la red cristalina en los granos es arbitraria y con igual probabilidad pueden encontrarse en cualquier orientación del espacio. Sin embargo la deformación plástica en frío ocasiona una orientación predominante de los granos.

Con una extracción muy lenta de calor durante la cristalización y por medio de otros procedimientos especiales pueden obtenerse trozos de metal formados por un solo cristal, es decir lo que se conoce como un **monocristal.** Estos tienen su empleo fundamentalmente en investigaciones científicas y en la fabricación de semiconductores.

* 1. **Anisotropía.**

Observando diversos planos de una red cúbica centrada en el cuerpo, puede llegarse a la conclusión de que la densidad con que estos planos están ocupados por los átomos es distinta.

Las propiedades de un cristal tomado aisladamente (monocristal) en una dirección dada difieren de sus propiedades en otra dirección y dependen como es natural, de la cantidad de átomos que se encuentran en esta dirección. La diferencia de propiedades en dependencia de la dirección en que se ensaya recibe el nombre de **anisotropía** y es una característica de todos los cristales.

Un metal real está formados por muchos cristales. Como cada cristal tiene una orientación arbitraria en cualquier dirección se encuentra aproximadamente la misma cantidad de cristales orientados al azar. Esto provoca que las propiedades del cuerpo cristalino sean prácticamente iguales en todas las direcciones, a pesar de que las propiedades de cada cristal componente del mismo dependen de la dirección. Este fenómeno se llama **seudoisotropía** (falsa isotropía)**.**

**1.5 Defectos cristalinos. Cristal perfecto y cristal real.**

Los cristales de un metal tienen por lo general pequeñas dimensiones. Por esto los objetos metálicos están formados por un número muy grande de cristales. Esta estructura recibe el nombre de **policristalina.**

En un agregado policristalino los cristales aislados no tienen la posibilidad de tener forma regular. Estos cristales de forma irregular del agregado policristalino reciben el nombre de **grano.**

La orientación de la red cristalina en los granos es arbitraria y con igual probabilidad pueden encontrarse en cualquier orientación del espacio. Sin embargo la deformación plástica en frío ocasiona una orientación predominante de los granos.

Con una extracción muy lenta de calor durante la cristalización y por medio de otros procedimientos especiales pueden obtenerse trozos de metal formados por un solo cristal, es decir lo que se conoce como un **monocristal.** Estos tienen su empleo fundamentalmente en investigaciones científicas y en la fabricación de semiconductores.

**Defectos de la red cristalina.**

Las investigaciones han demostrado que la orientación cristalina interna del grano no es regular. Esto se debe a que las velocidades reales de solidificación son mayores que las teóricas y no se efectúan totalmente los procesos de ordenamiento de las redes cristalinas y por consiguiente se originan defectos en la estructura del metal. El grado de perfección de la estructura cristalina determina en gran medida las propiedades de los metales. Por esto hay que estudiar las imperfecciones de la estructura cristalina que suelen encontrarse o lo que es lo mismo la estructura de los cristales reales.

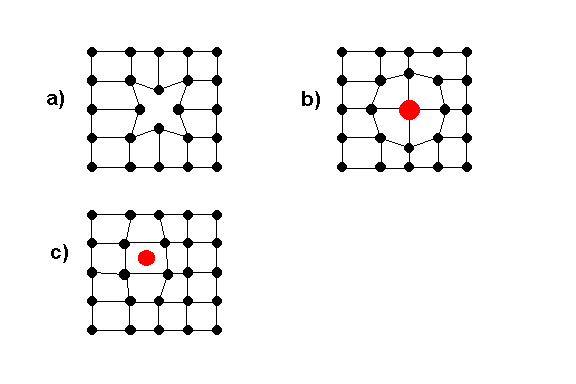
Se puede definir las imperfecciones como **los defectos que se presentan en la red cristalina.**

Todo lo que rompa de una forma u otra la continuidad de la red será una imperfección.

Los defectos en la red cristalina se clasifican en **puntuales o lineales.**

* **Defectos puntuales:**

1. Vacantes (huecos).
2. Inserciones.
3. Sustituciones.

Defectos Puntuales de la Red Cristalina: a) hueco. b) sustitución. c) inserción.

* **Las vacantes o huecos:** Son “huecos” en los nodos donde debió alojarse un átomo que no lo hizo (fig 7). Aumentan su número a medida que aumenta la temperatura ya que aumentan también las oscilaciones térmicas y en virtud de esto se eleva el número de huecos de la red.
* Las inserciones: **Se presentan por la introducción de los átomos en los espacios intersticiales.**
* Los átomos sustituidos: **Es cuando un átomo de diferente naturaleza a la de la red ocupa el lugar de una celdilla elemental.**

Defectos lineales (dislocaciones).

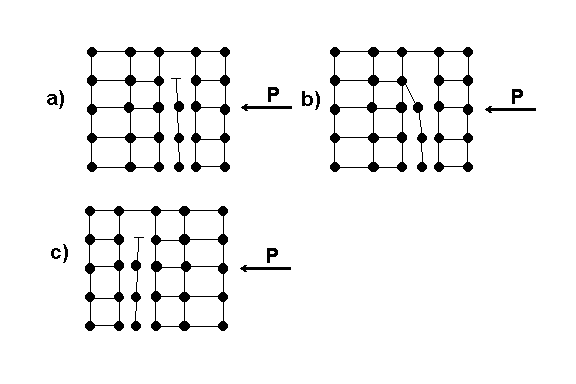
**La dislocación es un defecto provocado por la inserción por una causa cualquiera de un plano superfluo de átomos en la red cristalina, lo que provoca la alteración de la simetría del retículo.**

Las dislocaciones **se encuentran en todas las redes cristalinas en grandes cantidades 106 en 1 cm3 (en metales puros). Las dislocaciones como se verá en clases posteriores juegan un papel fundamental en el proceso de deformación plástica de los metales.**

Las dislocaciones pueden ser de arista o de hélice, o sea dislocaciones de borde o dislocaciones en espiral.

Al aplicarse una fuerza la dislocación puede trasladarse a través de un plano perpendicular al plano dislocado y al final de este. En la Fig 9 del Guliaev se muestra el movimiento más típico de la dislocación.

* Proyectar retrotransparencia y explicar como consecuencia de la deformación de la red en la región de la dislocación esta se desplaza fácilmente desde la posición neutra y el plano continuo, al pasar a la posición intermedia (fig 9 b) se convierte en el plano adicional.

Movimiento de las dislocaciones por efecto de la acción de la carga.

Las dislocaciones permiten la elaboración más fácil de los metales. Un metal perfecto libre de dislocaciones y vacantes requiere de esfuerzos diez veces mayores que los requeridos en la práctica para producir la deformación plástica en el metal.

Los huecos se desplazan continuamente en la red, ya que el átomo vecino al hueco pasa al hueco y deja vacío el sitio que antes ocupaba. La elevación de la temperatura, es decir la movilidad térmica de los átomos aumenta el número de huecos.

Los defectos lineales no se mueven espontánea y caóticamente como los huecos. Pero basta una pequeña tensión para que una dislocación empiece a moverse formando un plano, y en la sección una línea de deslizamiento. Fig 11 c.

Como se planteó anteriormente, alrededor de las dislocaciones se crea un campo de red cristalina deformada. **La energía de deformación de la red cristalina** se caracteriza por el denominado **vector de Burgers.** La magnitudde este caracteriza la facilidad de desplazamiento de las dislocaciones.

* Estudiar por el libro como se determina el Vector de Burgers.

Además de la estructura de la dislocación tiene importancia también la característica total de la cantidad de dislocaciones, que se llama densidad de dislocaciones, en centímetros correspondientes a un cm3, es decir, la dimensión de la densidad de dislocaciones **ρ = cm/cm3 = cm-2** . Para los metales la densidad de dislocaciones generalmente oscila entre los límites de 108 a 1013 cm-2 (un millón de kilómetros de dislocaciones por cm3).

Un grano no es un cristal monolítico formado por capas atómicas rigurosamente paralelas. En realidad está constituido por una especie de mosaico de bloques aislados con dimensiones de 1 x 10-5 – 1 x 10-3 cm (1000 – 100000 Å), en los cuales los planos cristalográficos, están orientados formando un pequeño ángulo (varios minutos).

A esta estructura del grano se le conocen con el nombre de **estructura de mosaico,** y los bloques que la constituyen **bloques de del mosaico.**

Los bloques se unen frecuentemente en agregados más grandes llamados **fragmentos.** Cada fragmento contiene un gran número de bloques y entre los fragmentos existe a su vez una diferencia de orientación de varios grados.

De este modo entre los granos del metal hay una diferencia de orientación cuya magnitud es de varias decenas de grados.

Los granos pueden estar formados por fragmentos cuya orientación difiere solamente en unos granos. Finalmente los fragmentos pueden estar constituidos por bloques entre los cuales la diferencia de orientación es muy pequeña (varios minutos). Esta estructura de 3 escalones **no es obligatoria.**

Los bloques de mosaico son generalmente muy pequeños, pero pueden observarse al microscopio electrónico de transmisión. De ordinario las dimensiones de los granos y su grado de orientación se miden por análisis estructural roengtnográfico (difracción de rayos X).

Si los fragmentos son muy grandes pueden verse bien al microscopio óptico. La figura 13 muestra la microestructura de un metal constituido por granos grandes, los cuales están formados a su vez por fragmentos y bloques.

Podemos resumir que un cristal metálico real tienen imperfecciones atómico cristalinas (huecos, dislocaciones) y estructurales (bloques y fragmentos)

Los bloques y fragmentos están distribuidos irregularmente y se concentran en los límites o bordes de los granos, fragmentos y bloques.

Los granos vecinos están muy desorientados >5º y entre ellos existe una capa límite cuya estructura está muy alterada y en la cual existe una alta concentración de defectos atómicos cristalinos.

La diferencia de orientación de los bloques no es grande <1º. La unión de los bloques entre sí, conservando su estructura cristalina regular, aunque deformada, se efectúa por medio de las dislocaciones. La densidad de dislocaciones será tanto mayor cuanto mayor sea el ángulo entre la orientación de los bloques.

Las propiedades de un metal dado están relacionadas con muchos factores de la estructura interna, como la cantidad (densidad) de huecos y dislocaciones que contiene y su distribución (estructura de dislocación) y las dimensiones y diferencia de orientación de la estructura en bloques (estructura fina).

**Difusión en los metales:** Es el movimiento de los átomos dentro de la estructura cristalina del metal. Se pude clasificar en homodifusión y heterodifusión.

* **Autodifusión:** Movimiento de traslación de los átomos del mismo metal dentro de la estructura cristalina; casi siempre a través del desplazamiento de los mismos de sus posiciones de equilibrio.
* **Heterodifusión:** Movimiento de traslación los átomos de un metal soluto dentro de la estructura cristalina de otro metal disolvente; puede ocurrir a través del desplazamiento de los mismos a través de los huecos del retículo cristalino o de forma intersticial.

La posibilidad de que tenga lugar la difusión y por consiguiente el tratamiento termoquímico, se determina por los siguientes factores.

1. La solubilidad del elemento a difundir en el metal base.
2. La tendencia que tiene el sistema de equilibrar la concentración por todo el volumen.
3. La oscilación térmica de los átomos.

Generalmente el tratamiento termoquímico se realiza mediante la colocación de las piezas en un medio rico en elemento que se quiere difundir en el metal base.

Cuando el ambiente es gaseoso (el caso más frecuente) durante el tratamiento termoquímico ocurren tres procesos principales:

1. Disociación: la que ocurre en el medio gaseoso y consiste en la descomposición de la molécula y la formación de átomos activos del elemento a difundir.

Por ejemplo:

2 CO → CO2 + C o NH2 → 3H + N

Estas reacciones muestran las condiciones en que se liberan los átomos activos de carbono y nitrógeno aptos para disolverse en el metal.

1. Absorción: Tiene lugar en el límite gas – metal y consiste en la absorción (disolución) de los átomos por la superficie del metal. Este proceso es posible en caso de que el elemento B que se difunde se pueda disolver en el metal A básico.
2. Difusión: Es la penetración hacia el interior del metal del elemento absorbido.

Como resultado de los mencionados procesos se forma la capa difusiva, que se caracteriza porque la concentración del elemento que se difunde es bastante elevada en la superficie y a medida que nos alejamos de la misma va disminuyendo gradualmente.

La profundidad y concentración de la capa están determinadas por la magnitud y correlación de los tres procesos mencionados: absorción, disociación y difusión:

Cuando la velocidad de difusión es insuficiente se obtiene una capa de alta concentración, pero de poca profundidad; cuando la absorción es poco activa, la superficie absorbe un pequeño número de átomos y la capa difundida tiene baja concentración.

La suma de la influencia ejercida por los tres procesos puede ser representada por la cantidad de sustancia en gramos que se difunde en la unidad de tiempo (en segundos) por unidad de superficie (cm2). Esta magnitud se llama coeficiente de difusión (D) puede ser representado matemáticamente por la siguiente expresión:



Donde:

D: Coeficiente de difusión.

A: Coeficiente que depende esencialmente del tipo de red cristalina y de la frecuencia de las oscilaciones del átomo que se difunde.

e: Base de los logaritmos naturales (2,718).

Q: Energía de activación (Kal/átomo - gramo.).

R: Constante de los gases (1,987 Kal/g – atom.).

T: Temperatura absoluta (K).

Ya que R es una magnitud constante, entonces la difusión dependerá fundamentalmente de la temperatura y la energía de activación. Veamos la representación moderna del mecanismo de difusión según Frenkel:

Se sabe que una temperatura dad determina la energía del sistema. Al igual que existe la fluctuación de concentración, en el sistema hay cierta fluctuación de energía. Es decir, en el enrejado hay una determinada cantidad de átomos que poseen una energía bastante superior a la promedio. Esta energía se manifiesta por medio de las oscilaciones, y el átomo que posee la energía, sale de su posición de equilibrio en la red y pasa a ocupar posiciones irregulares.

Este traslado de los átomos relativamente energetizados crea espacios libres (vacancias) en el enrejado cristalino. La presencia de tales espacios libres en la red es lo que asegura la posibilidad de que se formen soluciones sólidas sustitucionales. Para la formación de soluciones sólidas intersticiales no es imprescindible que se produzcan tales vacancias, ya que el elemento que se disuelve intersticialmente puede difundirse sin que existan vacancias.

En estas soluciones sólidas la difusión ocurre por medio del desplazamiento de los átomos dentro de la red, de los átomos del soluto. El aumento de la temperatura eleva el número de vacancias, a consecuencia de esto aumenta bruscamente el coeficiente de difusión.

La energía de activación Q caracteriza la magnitud de energía necesaria para trasladar un átomo de una posición en la red a otra (por ejemplo, de una posición regular a una irregular). Cuanto mayor es la magnitud Q, tanta más pequeña será la magnitud D.

La anisotropía de las propiedades se refleja también en los procesos de difusión. Así por ejemplo en la difusión de del cobre en el Zinc hexagonal ocurre en diferentes direcciones con diferentes velocidades. En el plano de la base se desarrolla más rápidamente y en la dirección del eje principal más lentamente.

Los límites de granos son regiones donde los procesos de difusión se facilitan, debido a la presencia de imperfecciones en el enrejado cristalino. Sin embargo, esta influencia de los límites de granos no siempre la misma:

Si la solubilidad de la sustancia que se difunde es poca, entonces la difusión tenderá a prevalecer por el límite de los granos. En caso de alta solubilidad en el metal base del elemento que se difunde, el rol de los bordes de grano se reduce, y en muchos experimentos prácticamente no se ha reflejado.

La finalidad del tratamiento termoquímico es la obtención de diferentes propiedades físico – químicas en la superficie del acero con un gran número de elementos (carbono, nitrógeno, silicio, aluminio, cromo, molibdeno, boro, azufre, saturación simultánea con carbono y nitrógeno, o sea, cianuración, etcétera).

Tanto el acero que se va a emplear como elemento saturante se escogen de acuerdo con el medio en que se van a trabajar y del tipo de trabajo que desarrollarán.

Ventajas de los tratamientos termoquímicos.

* No dependen de la forma externa de las piezas (sobre todo de alta frecuencia).
* Mayor diferencia entre las propiedades del núcleo y la superficie.
* Las consecuencias del sobrecalentamiento pueden subsanarse en tratamiento térmico.

Por lo general las piezas que se someten a tratamiento termoquímico se colocan en un medio rico en el elemento que se difunde.

Los principales procesos termoquímicos son:

* Cementación del acero (C).
* Nitruración del acero (N).
* Cianuración o carbonitruración del acero (C).
* Metalización por difusión.

1. Cromización (Cr)
2. Calorización (Aliting) (Al).
3. Siliciación (Si).
4. Borado (B).

( Detallar en la bibliografía los aspectos fundamentales de cada uno de estos tratamientos termoquímicos.

* **Estado de las sustancias.**

Cualquier sustancia puede encontrarse en tres estados de agregación: **líquido, sólido, y gaseoso.** En los metales puros a temperaturas determinadas se producen la variación de los estados de agregación. Las temperaturas de las transiciones dependen de la presión, pero a presión constante están completamente determinadas.

⇒ ¿En qué se diferencian los estados gaseoso, líquido y sólido?

En los gases no existe una distribución regular de las partículas (átomos y moléculas), sus partículas se mueven caóticamente, chocan unas con otras y el gas tiende a ocupar el mayor volumen posible.

En los líquidos, las partículas (átomos y moléculas conservan únicamente el llamado orden próximo, es decir, en el espacio que está distribuido regularmente una cantidad pequeña y no los átomos de todo el volumen como en el sólido. Este orden próximo siempre puede aparecer y desaparecer por la acción de las oscilaciones térmicas.

En los sólidos existe un orden determinado, regular de distribución de los átomos, las fuerzas de atracción y repulsión mutua están en equilibrio y el sólido conserva su forma.

* **Condiciones energéticas y mecanismos del proceso de cristalización.**

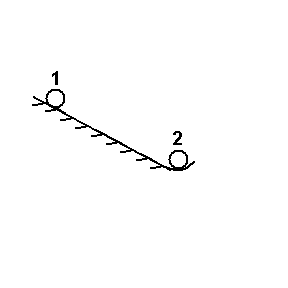
**⇒ ¿Qué estudiante puede definir que es la cristalización?**

**Cristalización:** Es el proceso durante el cual aparecen los cristales y se forma la red cristalina al pasar del estado líquido al sólido

**⇒ ¿Cómo se explica que a una temperatura exista el estado sólido y a otras existe el estado líquido? ¿Por qué se produce esta transformación a temperaturas rigurosamente determinadas?**

## En la naturaleza todas las transformaciones que transcurren espontáneamente y por consiguiente la cristalización y la fusión están condicionadas por la circunstancia de que el nuevo estado en las nuevas condiciones es más estable desde el punto de vista energético, es decir, posee menos reserva de energía.

## Ejemplo: La bolita pesada que se encuentra en la posición 1 tiende a pasar a la posición 2 que es más estable, ya que la energía potencial en la posición 2 es menor que en la 1.

El estado energético de un sistema que tiene una cantidad enorme de partículas animadas de movimiento térmico se caracteriza por una función termodinámica especial llamada **Energía Libre (F).**

### F = U – T • S

Donde:

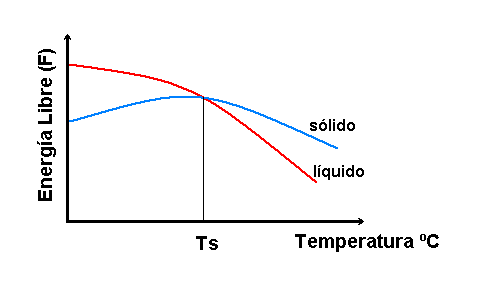
F: Energía libre del sistema.

**U:** Energía interna del sistema.

**T:** Temperatura absoluta.

**S:** Entropía.

Cuanto mayor es la energía libre de un sistema tanto menor es su estabilidad, y si es posible el sistema pasará a otro estado en que la energía libre sea menor (de modo semejante al ejemplo de la bolita.

Si varían las condiciones externas, por ejemplo la temperatura, **la energía del sistema cambia** siguiendo una ley compleja.

Por encima de la temperatura Ts tiene menor energía libre la sustancia en estado líquido y por debajo de Ts la sustancia en estado sólido. Por consiguiente por encima de Ts la sustancia deberá encontrarse en estado líquido y por debajo de Ts en estado sólido cristalino.

La temperatura Ts es la temperatura de equilibrio o temperatura teórica de cristalización. Sin embargo a la temperatura Ts no puede producirse el proceso de cristalización (o fusión) porque a esta temperatura.

**⇒ F líquido = F sólido**

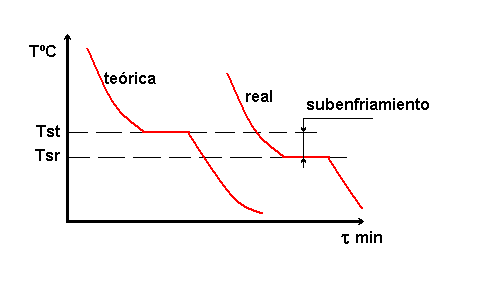
Para que la cristalización comience, es necesario que haya una disminución de la energía libre, esto solo es posible cuando el líquido se enfría hasta una temperatura menor que la del punto Ts. Esta temperatura recibe el nombre de **Temperatura Efectiva de Cristalización**. El enfriamiento por debajo de la temperatura de equilibrio de cristalización se denomina **subenfriamiento (n)**. De manera similar la transformación inversa (sólido – líquido), solo puede efectuarse a una temperatura superior a Ts, este fenómeno recibe el nombre de **sobrecalentamiento**.

Grado o magnitud de subenfriamiento.

Es la diferencia entre las temperaturas teóricas y efectivas de cristalización.

Ejemplo: Para el antimonio = 631 ºC – 590 ºC T teórica = 631ºC T real = 590ºC

El proceso de cristalización se puede representar por medio de curvas tomando como coordenadas el tiempo y la temperatura.

****Curvas teórica y real de enfriamiento durante la cristalización.

El tramo horizontal de la curva significa que la extracción del calor se compensa con el calor latente de cristalización que se desprende al producirse la formación de los nuevos cristales.

Mecanismo del proceso de cristalización.

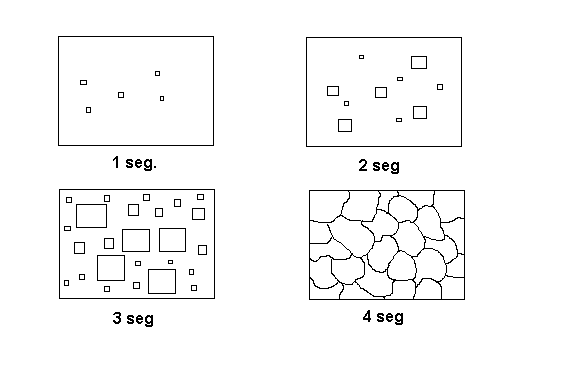
En 1878 D. Chernov indicó que el proceso de cristalización consta de dos procesos elementales:

**Primero:** Formación de partículas elementales (pequeños cristales) denominados gérmenes o núcleos, o centros de cristalización.

**Segundo:** Proceso de crecimiento de los cristales a partir de los centros ya formados.

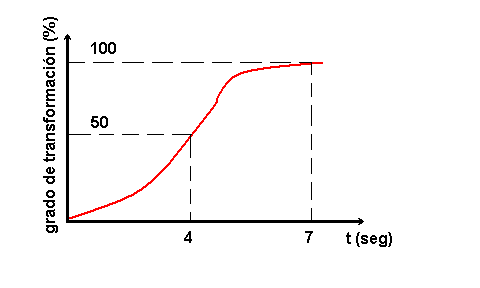
Este proceso se puede explicar a partir del esquema de I.L. Mirkin (fig 27 pág 48 LT)

Mecanismo de cristalización a partir del modelo de Mirkin.

****Suponiendo que durante la solidificación aparecen 5 núcleos por cada segundo se verá progresivamente el crecimiento de los núcleos que inicialmente surgen y la aparición de los nuevos. El crecimiento es constante y algo regular hasta tanto los granos comiencen a molestarse unos con otros y quedan cristales de forma irregular. Este mecanismo puede representarse a través de una curva cinética de cristalización.

**7seg**

5 seg



Características.

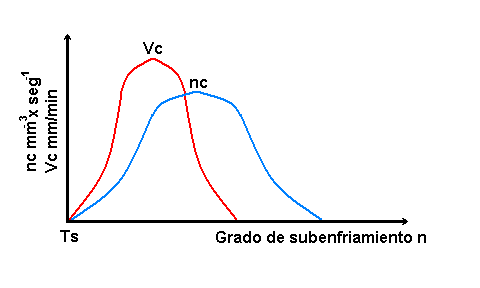
* En los primeros segundos es muy lento y surgen los primeros núcleos de cristalización.
* A medida que se desarrolla la cristalización cada vez participan mas cristales y el proceso se acelera.
* Por encima del 50% de transformación los granos tropiezan en su crecimiento y el proceso comienza a detenerse nuevamente.

La velocidad de todo proceso de cristalización está determinada por

Velocidad de formación de núcleos (nc).

Se define como el número de núcleos formados en la unidad de tiempo y la unidad de volumen.

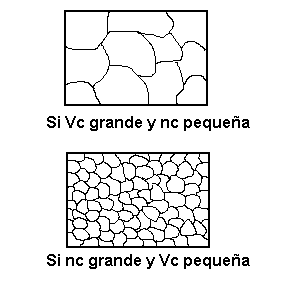
Velocidad de crecimiento del cristal (Vc).

****Se define como la velocidad de aumento de las dimensiones lineales de los crsitales en la unidad de tiempo (mm/seg).

* A (Ts) la temperatura teórica de cristalización (n = 0) los valores de Vc y nc son nulos y el proceso de cristalización no se desarrolla.
* Al aumentar el subenfriamiento los valores Vc y Nc crecen alcanzando un máximo después de crecer, disminuyendo prácticamente hasta cero si el subenfriamiento es grande.
* Esta disminución de Vc y nc a mayores valores de n se debe a que la movilidad de los átomos es menor al tropezar con otros y disminuye la capacidad del sistema para transformarse.

Los valores de Vc y nc tienen gran importancia en el tamaño de los cristales que se forman.

1. Si Vc es grande y nc pequeño se forman pocos cristales de gran tamaño.
2. Si nc es grande y Vc pequeño se formarán un gran número de cristales pequeños.

**Tamaño crítico de núcleo:** Tamaño de núcleo por debajo del cual, el mismo no será estable y no se producirá la cristalización ya que implicará un aumento de la energía libre.

La cristalización solo será posible si se alcanza el valor de Tc o valores mayores. **Es el tamaño mínimo de un núcleo capaz de crecer.**

**CONCLUSIONES.**

1. Los principales materiales de uso común en la industria se clasifican como metales, cerámicos, plásticos o resinas, vidrios, cemento o concreto, y materiales compuestos (composites).
2. Los cuerpos en estado sólido pueden ser amorfos o cristalinos y los metales pertenecen a los cuerpos cristalinos.
3. Los retículos cristalinos típicos de los metales son cúbicos (Centrado en el cuerpo o en las caras), hexagonal (simple y compacto) y tetragonal.
4. La anisotropía es una característica propia de los cristales y es la diferencia de propiedades en dependencia de la dirección del ensayo.
5. Existe una gran diferencia entre la estructura de un metal concebido teóricamente y un metal real, debiéndose a la presencia de los defectos puntuales o huecos, lineales o dislocaciones y los superficiales o intergranulares.
6. Si los huecos influyen en los procesos difusivos y los superficiales en la termofluencia, las dislocaciones influyen en las propiedades mecánicas disminuyendo o aumentando la resistencia en dependencia de su número o densidad.
7. En la conferencia de hoy se hizo énfasis en el proceso de cristalización y en las condiciones energéticas necesarias para la transformación espontánea del líquido al estado sólido.
8. Se pudo establecer que la materia se transforma en una nueva fase la cual debe tener un estado más estable desde el punto de vista energético.
9. Se pudo determinar que es de suma importancia el papel de la velocidad de enfriamiento y por ende del subenfriamiento en la morfología final de los granos del metal.

**Bibliografía.**

CALLISTER, WILLIAM D. Materials Science and Engineering. An Introduction. Fifth Edition. Departament of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc., 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7

CALLISTER, WILLIAM D. Ciencia e Ingeniería de Materiales. Una Introducción. Quinta Edición. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. Universidad de Utah. John Wiley & Son, Inc, 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7

GULIAEV, A P. Metalografía. Tomos I y II. Editorial Mir. Moscú. 1983. p 186 188.

KOZLOV, Y. Ciencia de los Materiales – 1 ed -. Editorial MIR. Moscú. 1986. p 76 –

78.

LAJTIN, Y. Metalografía y tratamiento térmico de los metales – 1 ed -. Editorial MIR.

Moscú. 1973. p 359 – 360.