SOLIDIFICACIÓN

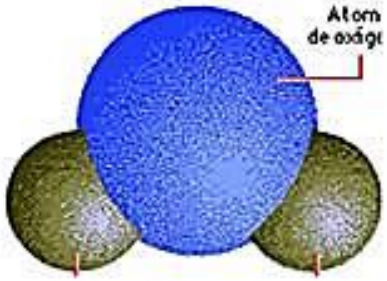
Elaborado por:
Ing. Roger Chirinos. MSc

Cabimas, Noviembre de 2013

SOLIDIFICACIÓN

FASE

- Tiene una misma estructura o arreglo atómico en todo el material
- Tiene aproximadamente una misma composición y propiedades; y
- Hay una interface definida entre una fase y cualquier otra que la rodea o que sea su vecina.



LÍQUIDO

SÓLIDO

GASOSO

SISTEMA QUÍMICO

- Combinación de componentes químicos bajo observación, donde dichos componentes pueden presentarse en su fase sólida, líquida o gaseosa.

SOLIDIFICACIÓN

Fundamentos básicos

Un material puede transformarse en cuatro estados:

LA SOLIDIFICACIÓN es un proceso físico que consiste en el cambio de estado de la materia de líquido a sólido producido por una disminución en la temperatura o por una compresión de este material. Es el proceso inverso a la fusión y sucede a la misma temperatura.

SOLIDIFICACIÓN

Fundamentos básicos

UN SÓLIDO es una sustancia formada por moléculas que se encuentran estrechamente unidas entre sí mediante una fuerza llamada **fuerza de cohesión**, las partículas están muy unidas y solo vibran en su puesto.

- La disposición de estas moléculas le da un aspecto de dureza y de rigidez con el que frecuentemente se le asocia.
- La forma definida de los sólidos es producto de la fuerza de cohesión que mantiene unidas a las moléculas.
- Los sólidos son **duros** y presentan dificultad para **comprimirse**. Esto se explica porque las moléculas que los forman están tan cerca, que no dejan espacios entre sí. Si se mira a su alrededor, podrá notarse que todos los sólidos tienen una forma definida. Esta característica se mantiene, salvo que actúe sobre ellos una fuerza tan grande que los deforme.

SOLIDIFICACIÓN

Fundamentos básicos

Los metales son fundidos para producir partes acabadas y semiacabadas. Para ello, deben solidificarse, atravesando dos pasos:

1. **Nucleación: Formación de núcleos**
2. **Crecimiento (núcleo): Formación de la estructura del grano**

Los gradientes térmicos definen la forma de cada grano

FORMACIÓN DE NÚCLEOS ESTABLES

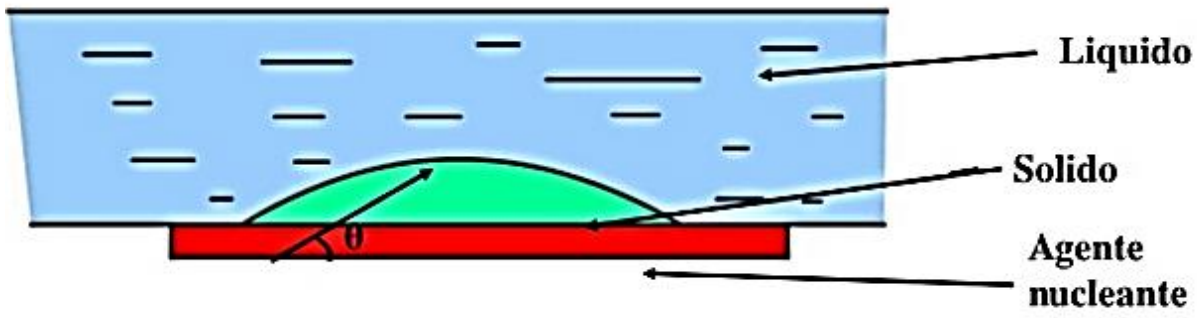
Los dos mecanismos principales por lo que tiene lugar la nucleación: Homogénea y Heterogénea

Nucleación Homogénea :

- **El metal por si mismo provee de átomos para formar núcleos**
- **Cuando un metal líquido puro se enfría lo suficiente, se crean numerosos núcleos homogéneos, mediante el movimiento lento de los átomos que se unen entre sí**
- **Una agrupación de átomos enlazados entre sí con un tamaño menor al "tamaño crítico" es llamado embrión**
- **Si el grupo de átomos logra un tamaño , ellos crecerán dentro de cristales**

FORMACIÓN DE NÚCLEOS ESTABLES

Solidificación en metales



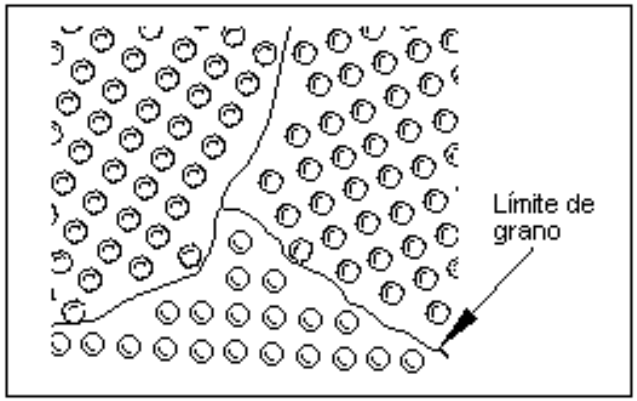
Nucleación Heterogénea:

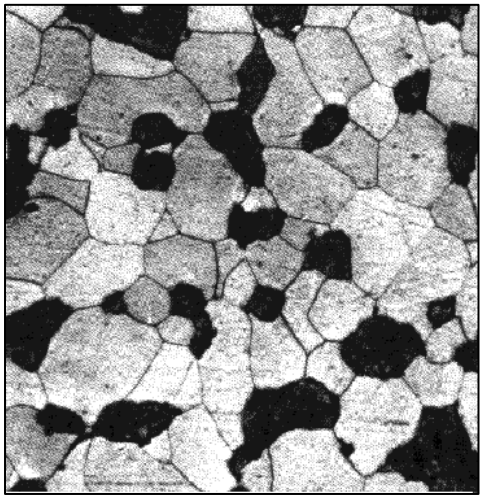
- La nucleación ocurre en un líquido sobre las superficies del material estructural. Por ejemplo: Impurezas insolubles
- Estas estructuras, llamadas agentes nucleantes, disminuyen la energía libre requerida para formar núcleos estables
- Los agentes nucleantes también hacen menor el tamaño del núcleo crítico
- Se requiere menor subenfriamiento para producir un núcleo estable
- Es aplicado a nivel industrial

CRECIMIENTO DE CRISTALES Y FORMACIÓN DE UNA ESTRUCTURA GRANULAR

Proceso de solidificación

- Los núcleos crecen dentro de los cristales en diferentes orientaciones
- Los límites cristalinos son formados cuando los cristales, se unen hasta completar la solidificación
- Los cristales en metales sólidos son llamados granos
- Los están separados por los límites de grano
- A mayor número de sitios de nucleación disponibles, mayor es el número de granos formados

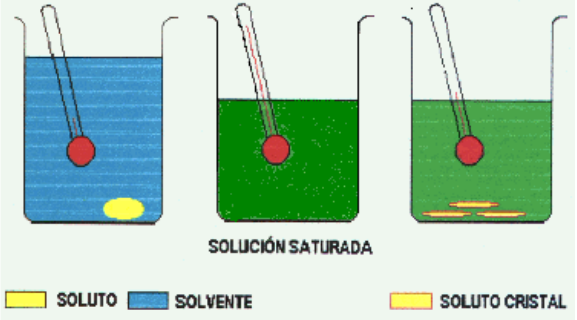




SOLIDIFICACIÓN

Fundamentos básicos

Cuando se empieza a combinar materiales distintos, como al agregar elementos de aleación a un metal, se producen **soluciones**. El interés es determinar la cantidad de cada material que se puede producir sin producir una fase adicional, es decir **solubilidad**.



Solubilidad

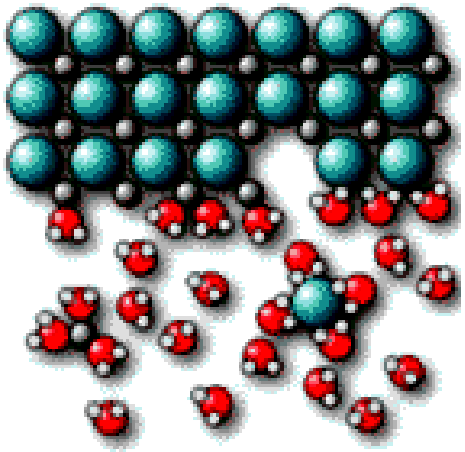
Cantidad de un material que se disolverá completamente en un segundo material, sin crear una segunda fase.

Se pueden presentar dos tipos de solubilidad:

- **Solubilidad Ilimitada:** Condición que se presenta cuando la cantidad de un material que se disolverá en otro es ilimitada, sin crear una segunda fase.
- **Solubilidad Limitada:** Condición referente a que sólo se puede disolver una cantidad máxima de un material soluto en un material solvente

SOLIDIFICACIÓN

Solubilidad Ilimitada

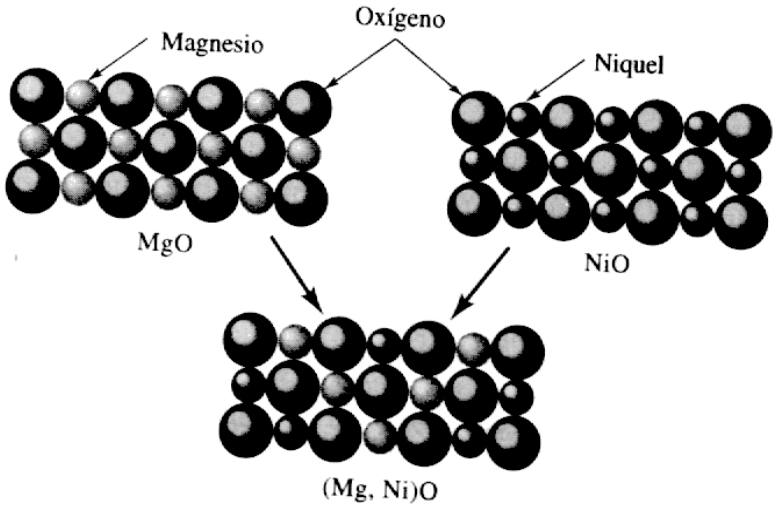


- **Factor de tamaño. Los átomos deben ser de tamaño similar, con no más del 15 por ciento de diferencia en su radio atómico, a fin de minimizar deformaciones en la red.**
- **Estructura cristalina. Los materiales deberán tener una misma estructura cristalina; de lo contrario, existirá algún punto en el cual ocurrirá la transición de una fase a otra con estructura distinta.**
- **Valencia. Los átomos deberán tener la misma valencia; de lo contrarío, la diferencia de electrones de valencia alentará la formación de compuestos, en vez de la formación de soluciones.**
- **Electronegatividad. los átomos deben tener aproximadamente la misma electronegatidad. Si las electronegatividades difieren de manera significativa, de nuevo se forman compuestos, como cuando se combina sodio y cloro para formar cloruro de sodio.**

Las condiciones de Hume-Rothery deben cumplirse, pero no son necesariamente suficientes para que dos metales tengan solubilidad sólida ilimitada. Un comportamiento similar se observa entre ciertos compuestos, incluyendo materiales cerámicos.

SOLIDIFICACIÓN

Solubilidad Ilimitada



Los iones de Mg y de Ni son similares en tamaño y valencia y, en consecuencia, pueden remplazar uno al otro en una red similar a la del cloruro de sodio, formando una serie completa de soluciones sólidas de la forma (Mg, Ni)O.

La solubilidad de los átomos intersticiales siempre es limitada. Los átomos intersticiales son mucho más pequeños que los átomos del elemento huésped, violando por lo tanto la primera de las condiciones de Hume-Rothery.

SOLIDIFICACIÓN

Solución Sólida

Endurecimiento por solución sólida

Aumento de la resistencia de una material introduciendo defectos puntuales en su estructura, de una forma deliberada y controlada introduciendo defectos puntuales en su estructura, de una forma deliberada y controlada.

El grado de endurecimiento por solución sólida se incrementa cuando:

- **Aumenta la cantidad de elementos aleantes**
- **Incremento en la diferencia del tamaño atómico entre el material huésped (solvente) y el elemento aleante (soluto). Una diferencia mayor en tamaño produce una mayor distorsión de la red inicial, haciendo aún más difícil el deslizamiento.**

La cantidad de elemento aleante que se puede agregar para producir un endurecimiento por solución sólida está limitada por la solubilidad de ese elemento en el material huésped.

Efecto del endurecimiento por solución sólida

- **El esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión y la dureza de la aleación son mayores que en los materiales puros.**
- **La ductilidad y la conductividad eléctrica de la aleación serán menor que la del material puro.**

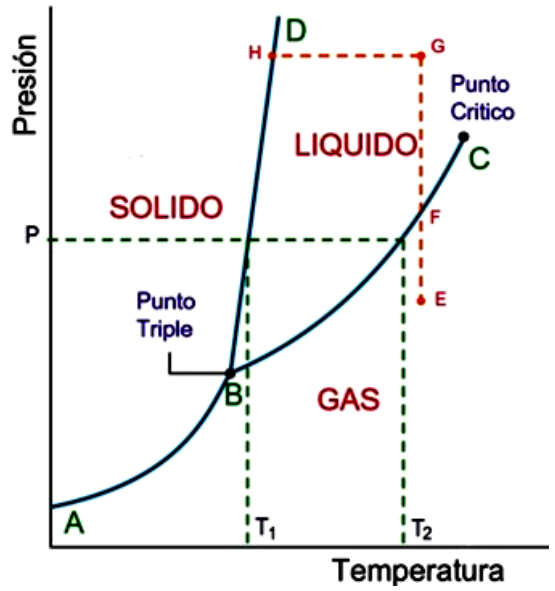
SOLIDIFICACIÓN

Diagrama de Fases

Diagramas de fases son representaciones gráficas temperatura vs. composición a presión constante, que permiten conocer:

- **Las fases presentes** para cada temperatura y composición
- **Solubilidades** a diferentes temperaturas de un componente en otro
- Temperatura de solidificación, entre otros

Se construyen a partir de datos experimentales de Análisis Térmico diferencial (ATD), observación metalográfica y difracción de rayos X.



REGLA DE LAS FASES (GIBBS)

FASES + GRADOS DE LIBERTAD = COMPONENTES + 2

(si la presión se mantiene constante F + L = C + 1)

DIAGRAMA DE FASES

Clasificación Simplificada para metales

SOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO LÍQUIDO/SOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO SÓLIDO

- **Presentan únicamente líneas de líquidus y sólidus**
- **Forman *soluciones sólidas substitucionales***

Para que dos metales formen soluciones sólidas substitucionales deben cristalizar en el mismo sistema

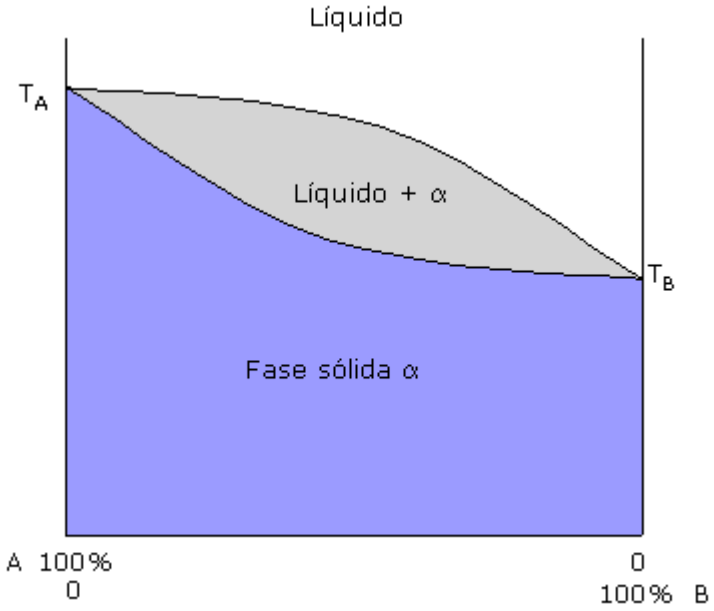
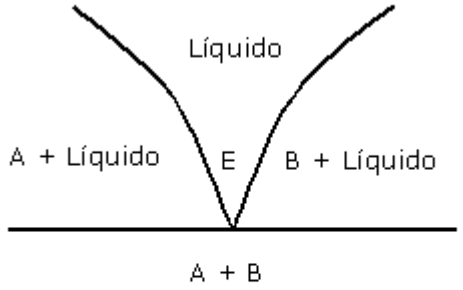


DIAGRAMA DE FASES

Clasificación Simplificada para metales

INSOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO SÓLIDO

- **Aparición de un punto invariante (eutéctico E)**
- **transformación eutéctica: Líquido--> Sólido A + Sólido B**
- **La curva de enfriamiento de una composición eutéctica sigue el mismo patrón que la de un metal puro**
- **El eutéctico presenta una morfología característica**



Fases + G.Libertad = Componentes + 1

3 + G.Libertad = 2 + 1
→G.Libertad=0
→E es un punto invariante

DIAGRAMA DE FASES

Clasificación Simplificada para metales

SOLUBILIDAD PARCIAL EN ESTADO SÓLIDO

- **Líneas de solvus**
- **Soluciones sólidas terminales**
- **En aleaciones que presentan soluciones sólidas terminales en que disminuye la solubilidad en estado sólido con la temperatura puede producirse un endurecimiento por precipitación y posterior envejecimiento (ej. Al-Cu)**

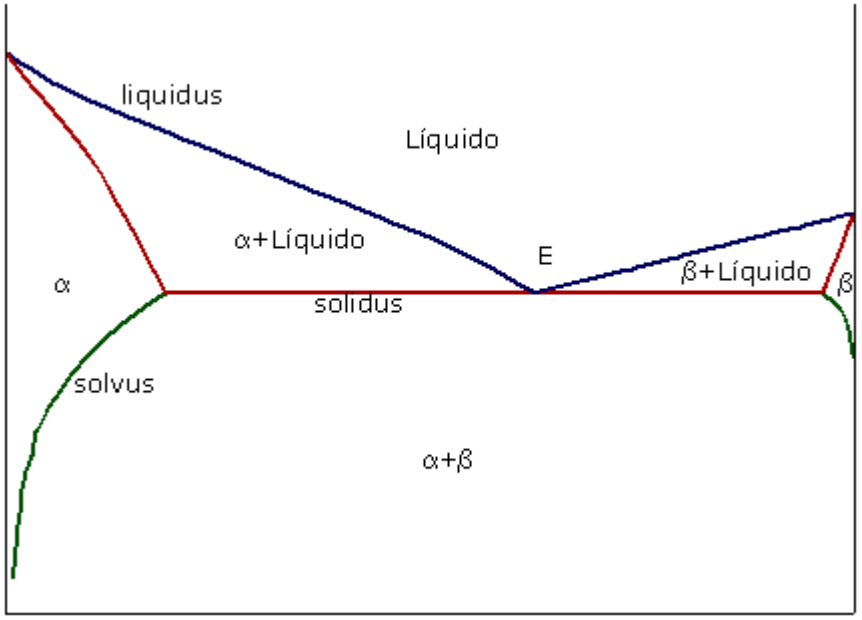
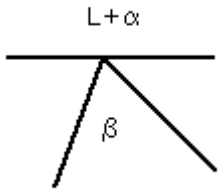


DIAGRAMA DE FASES

Diagramas con fases intermedias

Las fases intermedias se representan como líneas verticales en los diagramas de fases porque suelen tener un pequeño intervalo de composición lo que conduce a compuestos con fórmula química definida (ej. Mg_2Sn). Si presentan un intervalo de composición suele tratarse de *compuestos electrónicos* (que se representan por una letra griega).
Las fases intermedias tienen puntos de fusión superiores a los de los dos metales.

Reacción peritéctica: Líquido + Sólido 1 --> Sólido 2, donde el sólido 2 suele ser una fase intermedia.



Reacción monotéctica: Se presenta cuando los metales son sólo parcialmente solubles en estado líquido: Líquido 1 --> Líquido 2 + Sólido

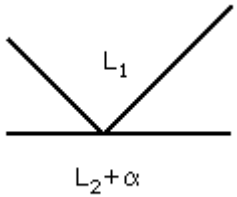
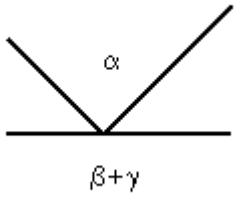


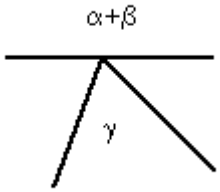
DIAGRAMA DE FASES

Diagramas con fases intermedias

Reacción eutectoide: **Sólido 1 --> Sólido 2 + Sólido 3**



Reacción peritectoide: **Sólido 1 + Sólido 2 --> Sólido 3**



***La regla de la palanca** permite conocer la composición química de las fases y las **cantidades relativas** de cada una de ellas.*