



Curso MT-1113

Ciencia de los Materiales

TEMA 4:

Microestructura y Propiedades

Soluciones sólidas

Formación de materiales policristalinos

Granos y bordes de grano

Diagramas de fase isomorfos

Curvas de Enfriamiento

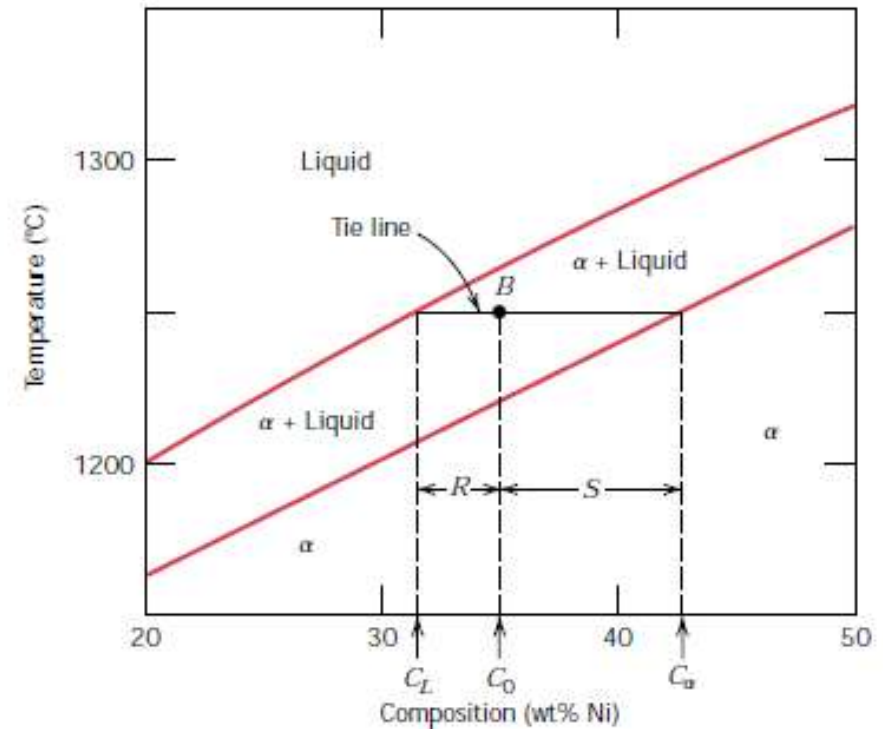
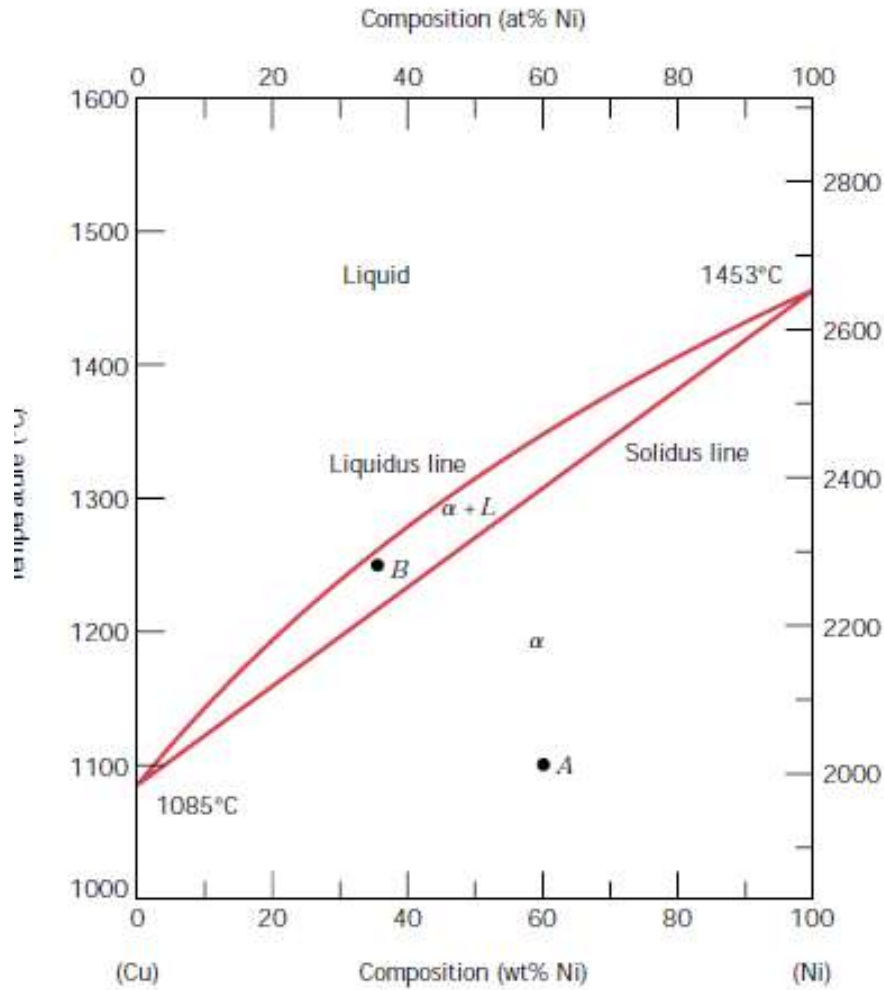
Otros diagramas de fase

Constitución de una aleación

Regla de la Palanca



Diagramas de Fase Isomorfos





¿Por qué estudiar diagramas de fase?

- Diseño de tratamientos térmicos para los materiales
 - Algunas propiedades de los materiales dependen estrechamente de la microestructura y de su historial térmico.
 - A pesar de que los diagramas de fase muestran las fases presentes en condiciones de equilibrio, en muchos casos las propiedades deseadas se consiguen en condiciones de no-equilibrio.
-



Información disponible en los diagramas de fase

Conocida la composición y temperatura de equilibrio, al menos hay tres clases de información disponible:

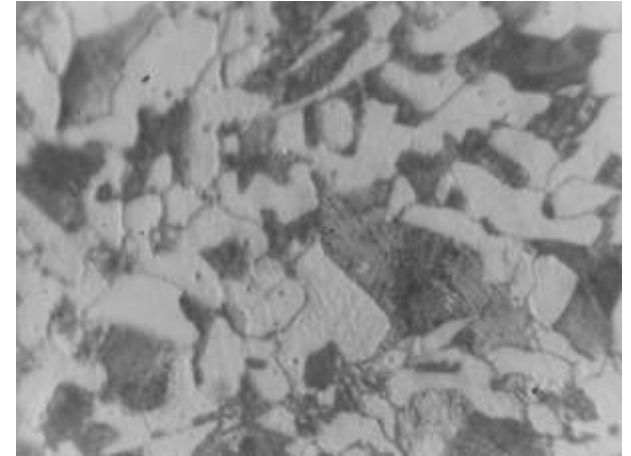
- Fases presentes.
 - Composición de las fases presentes
 - Cantidad relativa (porcentajes o fracciones) de las fases presentes
-



ALEACION

Una aleación es una sustancia que está constituida por dos o más elementos químicos, de los cuales por lo menos uno es un metal, por lo que una aleación presenta propiedades metálicas.

Las aleaciones pueden ser homogéneas o mezclas. Las aleaciones homogéneas son aquellas que están constituidas por una sola fase, mientras que las mezclas son una combinación de varias fases.

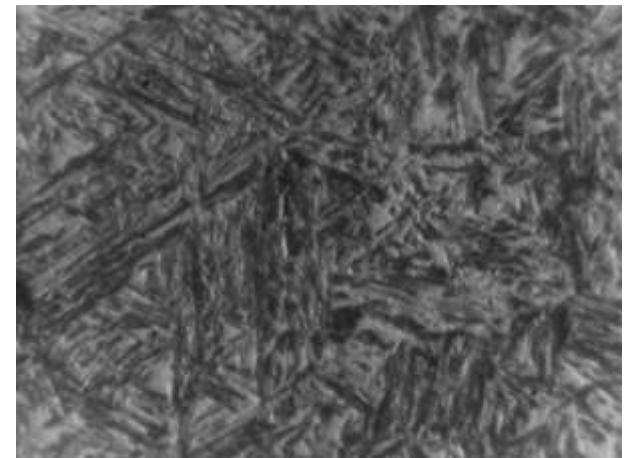


FASES

Algunos metales son alotrópicos en el estado sólido, por lo que tendrán diferentes fases sólidas. Cuando un metal sufre un cambio en su estructura cristalina, experimenta un cambio de fase, ya que cada tipo de estructura es físicamente distinta.

En el estado sólido existen tres fases posibles:

- a) De metal puro
- b) De aleación intermedia o compuesto
- c) De solución sólida.

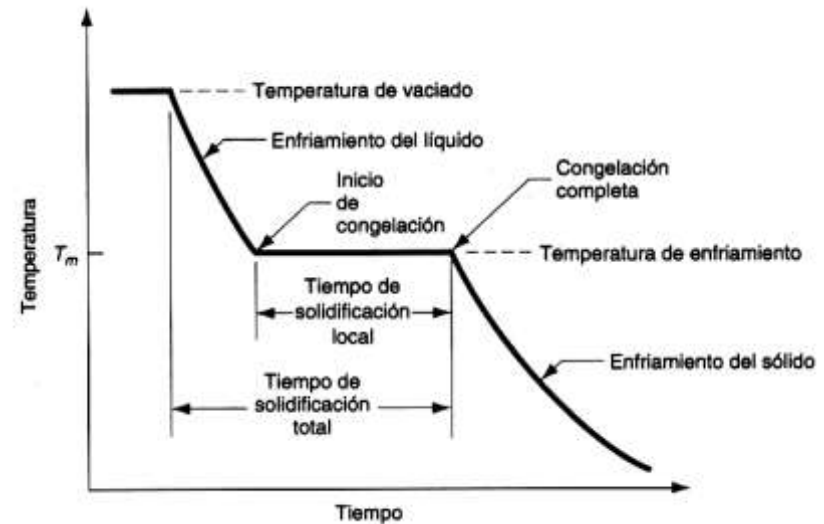




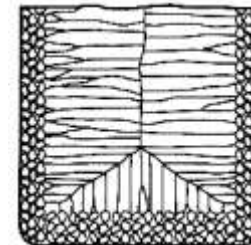
Un metal puro solidifica a una temperatura constante que constituye su punto de fusión. El proceso ocurre en un tiempo determinado como se muestra en una curva de enfriamiento.

La solidificación ocurre de la siguiente forma:

1. Por la acción refrigerante de la pared del molde, se forma una delgada película inicial de metal sólido en la pared inmediatamente después del vaciado. El espesor de esta película aumenta formando una costra alrededor del metal fundido creciendo hacia el centro de la cavidad. Los granos son finos equiaxiales y orientados aleatoriamente.
2. Al continuar el enfriamiento se forman más granos y el crecimiento ocurre en direcciones alejadas de la transferencia de calor. El calor se transfiere a través de la costra y la pared del molde creciendo los granos como agujas o espinas de metal sólido formándose ramas laterales que crecen y se forman ramas adicionales en ángulos rectos con las primeras. Este se denomina *crecimiento dendrítico del grano*. Estos granos adoptan una orientación preferencial siendo gruesos alineándose en forma de granos columnares hacia el centro de la fundición.



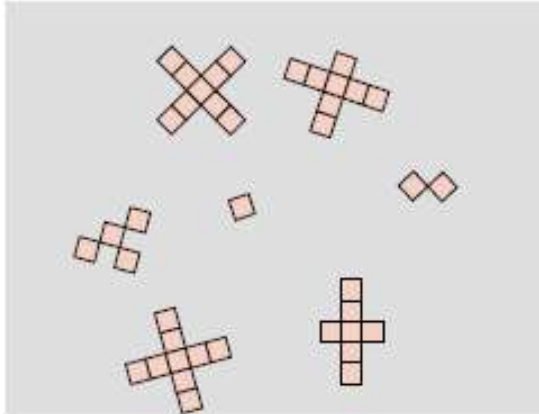
Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición



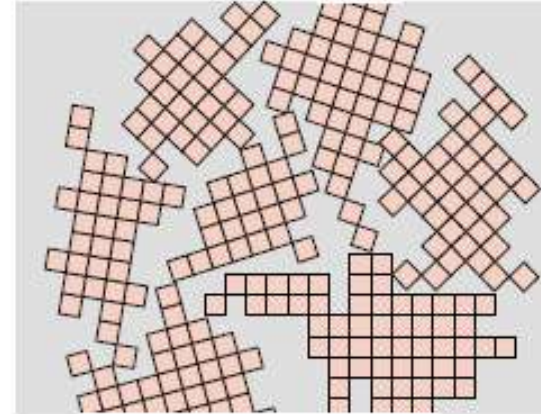
Microestructura de un metal puro solidificado.



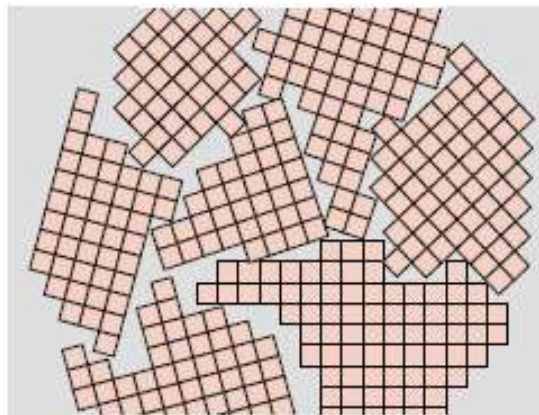
Solidificación



(a)



(b)



(c)



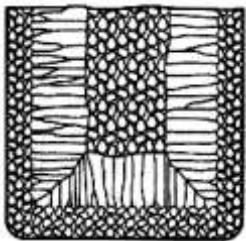
(d)



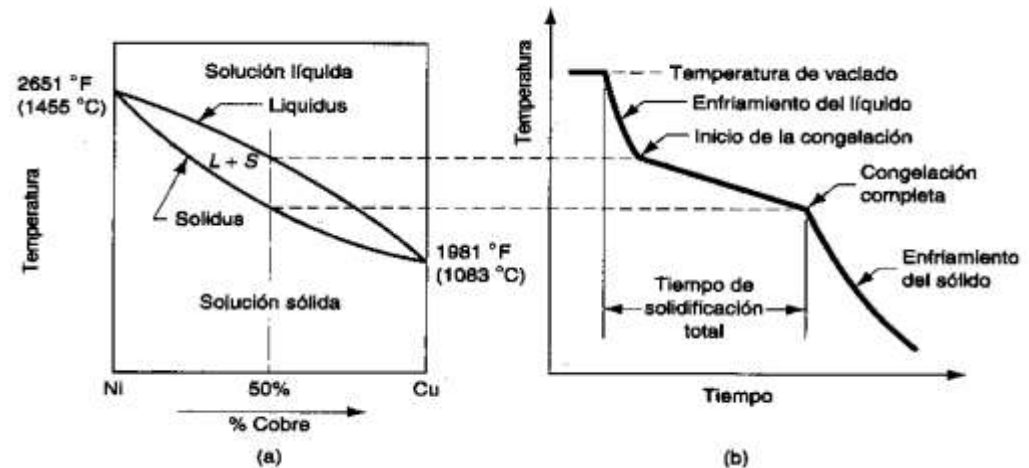
Las aleaciones solidifican generalmente en un intervalo de temperatura en lugar de una temperatura única. El rango exacto depende del sistema de aleación y de su composición particular.

La solidificación ocurre de la siguiente forma:

- Conforme desciende la temperatura, comienza la solidificación en la línea *liquidus* y se completa cuando se alcanza la *solidus*. Aquí se forma una delgada película en la pared del molde por un alto gradiente de temperatura en esta superficie.
- La solidificación continua mediante la formación de dendritas alejadas de las paredes.
- Por la propagación de la temperatura entre *liquidus* y *solidus* se forma una zona donde el metal sólido y líquido coexisten llamada *zona blanda*. Esto se debe a la lenta transferencia de calor fuera del metal caliente



Microestructura característica de fundición para una aleación.



a) Diagrama de fase para un sistema de aleación cobre-níquel y b) curva de enfriamiento asociada para una composición Ni-Cu 50-50% durante la fundición.



Es cualquier representación gráfica de las variables de estado asociados con las microestructuras.

Los más utilizados son



- Diagramas Binarios: Sistemas de dos componentes
- Diagramas Ternarios: Sistemas de tres componentes

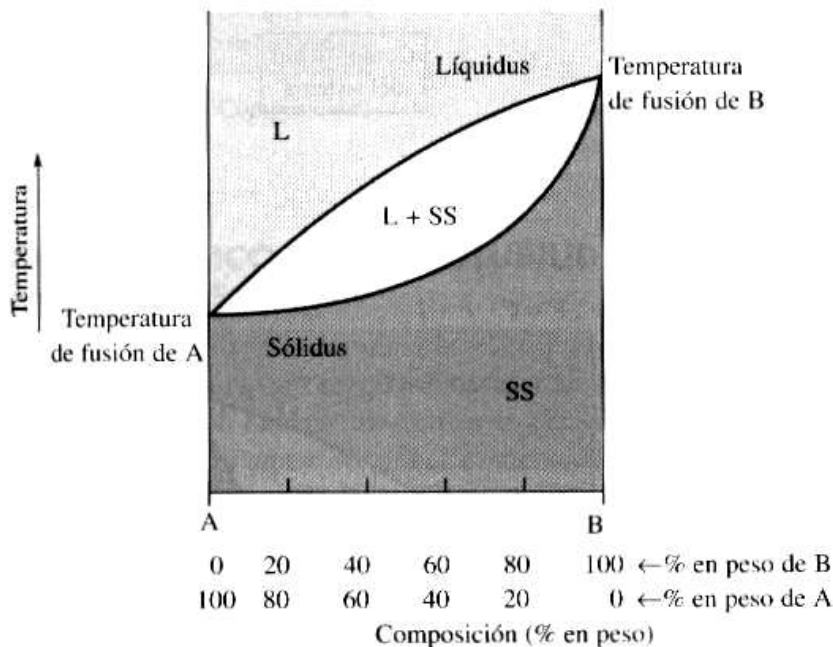


Diagrama de fases binario que muestran un caso de solubilidad total en estado sólido. El campo de la fase líquida se identifica mediante una L y la solución sólida mediante SS. La región donde coexisten las dos fases esta referenciada por L+ SS



TIPO I: SOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO SÓLIDO.

Diagrama binario en los que los dos componentes son completamente solubles entre sí tanto en estado sólido como en estado líquido. En el diagrama destaca:

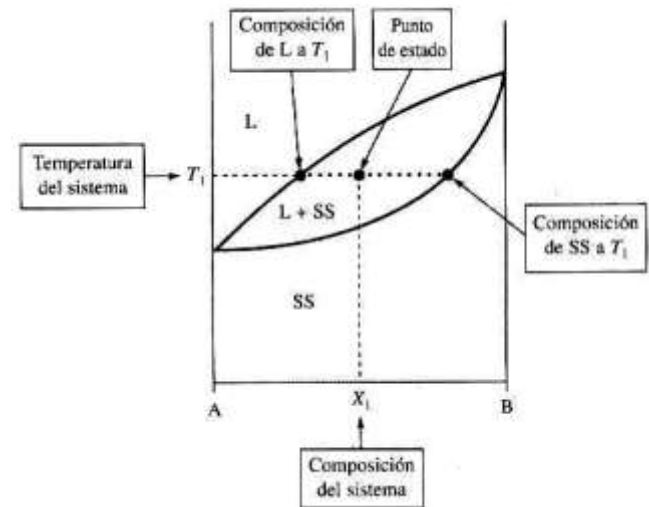
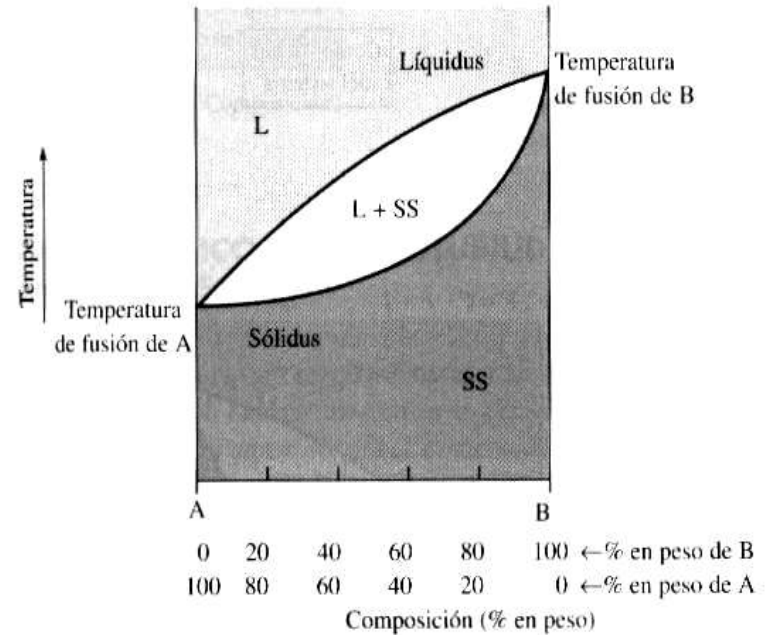
Se indican los puntos de fusión correspondientes a los dos componentes puros A y B.

A temperaturas relativamente altas cualquier composición habrá fundido completamente para dar lugar a un campo de fase líquida, región marcada con L.

A temperaturas bajas existe un campo correspondiente a una única fase de solución sólida que se señala como SS.

Entre los dos campos correspondientes a una sola fase se encuentra una región de dos fases que se indica como L + SS. El límite superior recibe el nombre de líquidus y el límite inferior sólidos.

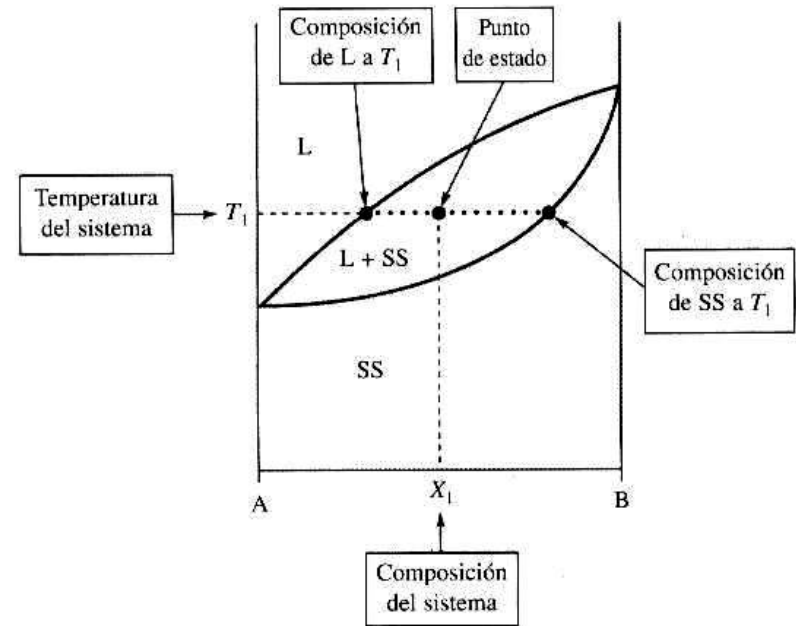
Las composiciones de las fases en el interior de la región de dos fases se determina mediante una línea de temperatura constante.





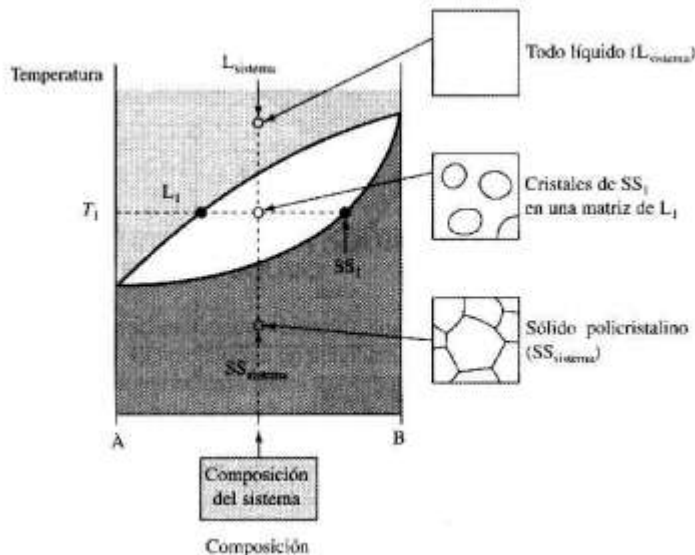
TIPO I: SOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO SÓLIDO.

La composición de cada fase se establece de la siguiente forma:
La línea horizontal (línea de temperatura constante) que pasa por el punto de estado corta tanto a la línea de líquidus como la de solidus.
La composición de la fase líquida viene dada por el punto de intersección con la línea líquidus y la de la fase sólida viene dada por el punto de intersección con la línea solidus.



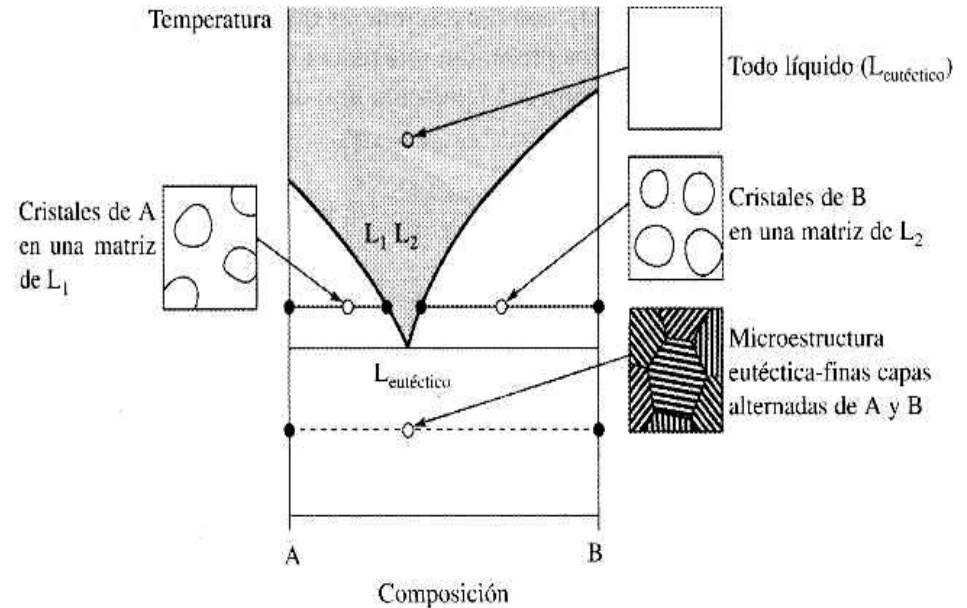
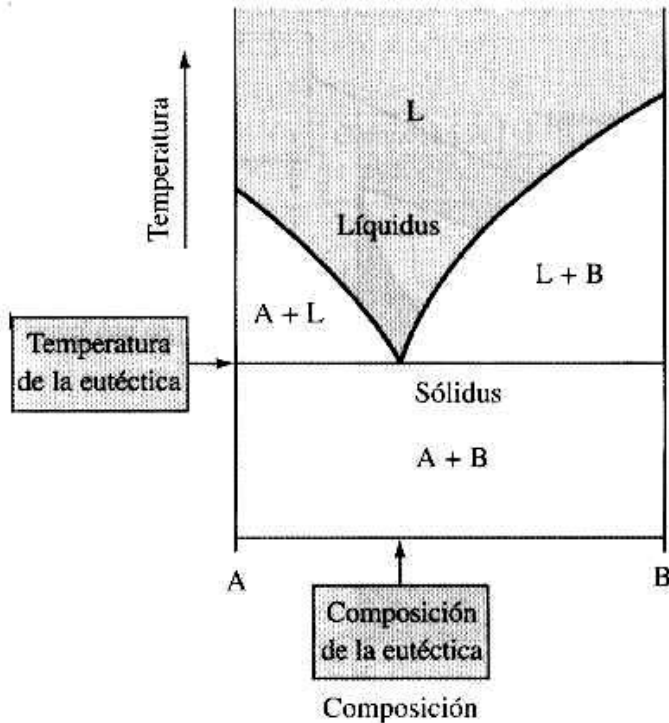
Las composiciones de las fases en el interior de una región de dos fases se determinarán mediante una línea de temperatura constante

Varias microestructuras características de distintas regiones del diagrama de fases con solubilidad total en estado sólido.





TIPO II: DIAGRAMA EUTÉCTICO CON INSOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO SÓLIDO.



1. A temperaturas relativamente bajas existe una zona de coexistencia de dos fases para los sólidos puros A y B.
2. El sólidus es una línea horizontal que se corresponde con la temperatura de la eutéctica.

Microestructuras características de distintas regiones de un diagrama de fases eutéctico binario con insolubilidad total.



TIPO II: DIAGRAMA EUTÉCTICO CON INSOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO SÓLIDO.

A medida que se agrega B en A, la temperatura para el comienzo de la solidificación disminuye. Lo mismo ocurre a medida que se agrega A en B.

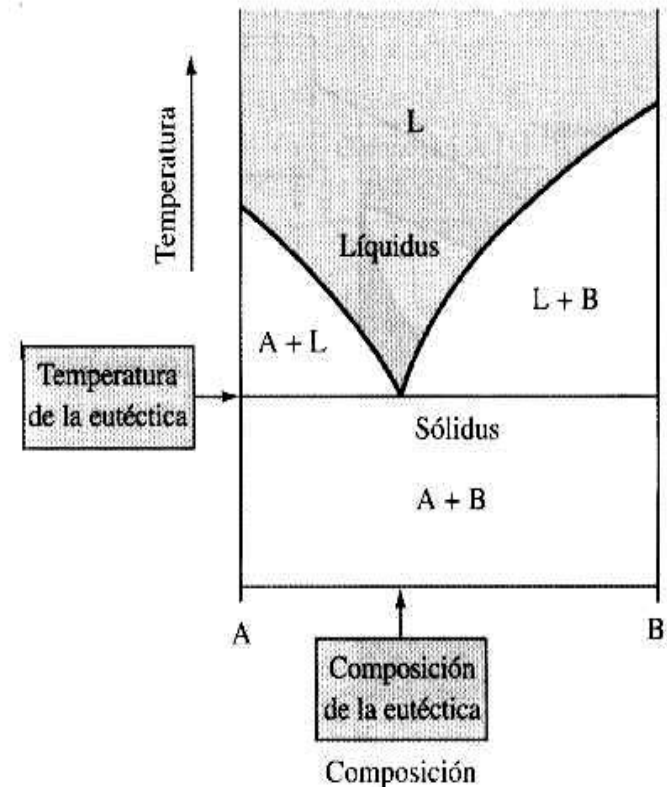
Ahora como cada metal disminuye su punto de solidificación (línea líquidus) debe mostrar un mínimo.

Esto lo señala la línea que muestra un mínimo en el punto E, conocido como el punto Eutéctico, para una composición eutéctica.

A temperaturas relativamente bajas existe una zona de coexistencia de dos fases para los sólidos puros A y B.

El sólus es una línea horizontal que se corresponde con la temperatura de la eutéctica.

El diagrama está formado por cuatro áreas. El área superior de la línea *líquidus* es una solución líquida homogénea de una sola fase, ya que los dos metales son solubles en el estado líquido. Las áreas restantes son de dos fases, cada área está limitada a lo largo de una línea horizontal por fases simples.



Como los dos metales son completamente insolubles en el estado sólido, cuando la solidificación comienza, el único sólido que se puede formar es un metal puro. También, cuando cada aleación está completamente solidificada, debe ser una mezcla de dos metales puros.



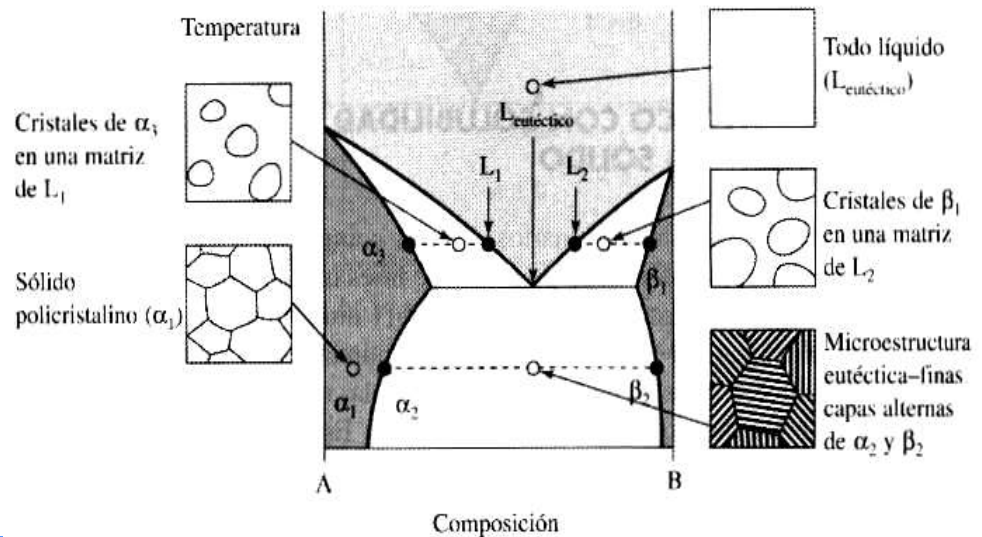
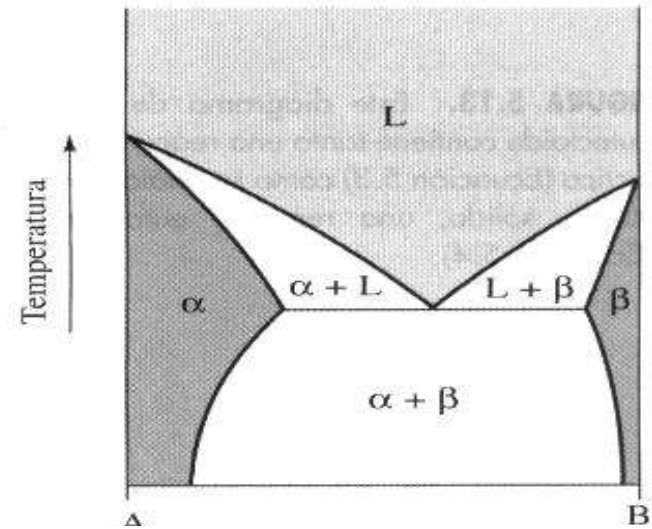
TIPO III: DIAGRAMA EUTÉCTICO CON SOLUBILIDAD PARCIAL EN ESTADO SÓLIDO

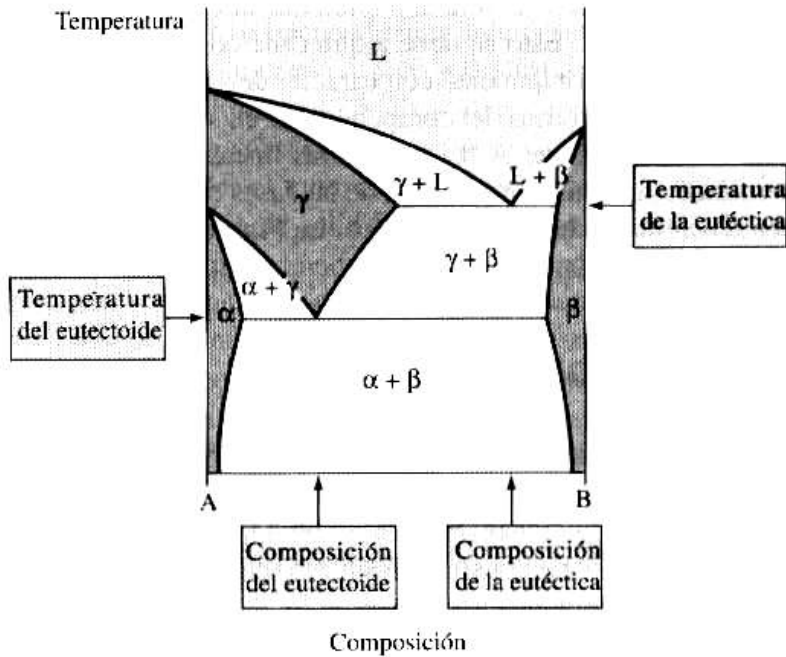
En las aleaciones de este sistema, los cristales de A puro y de B puro nunca solidifican, sino que siempre solidifican en una mezcla de soluciones. Así se marcan las áreas de la dos fases de solución sólida, α (alfa) y β (beta). Estas fases presentan estructuras cristalinas distintas. En cualquiera de los casos, la estructura cristalina de α será la misma del componente A y la de β será la del componente B. Estas soluciones sólidas próximas a los ejes se conocen como soluciones sólidas terminales.

Las áreas restantes de dos fases se pueden marcar ahora como líquido+ α , líquido+ β y α + β .

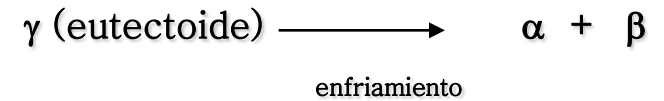
La transformación durante el enfriamiento de un líquido con la composición eutéctica en dos fases sólidas con una microestructura caracterizada por un tamaño de grano relativamente fino puede ser considerada como un tipo de reacción química.

La reacción eutéctica se puede escribir como:

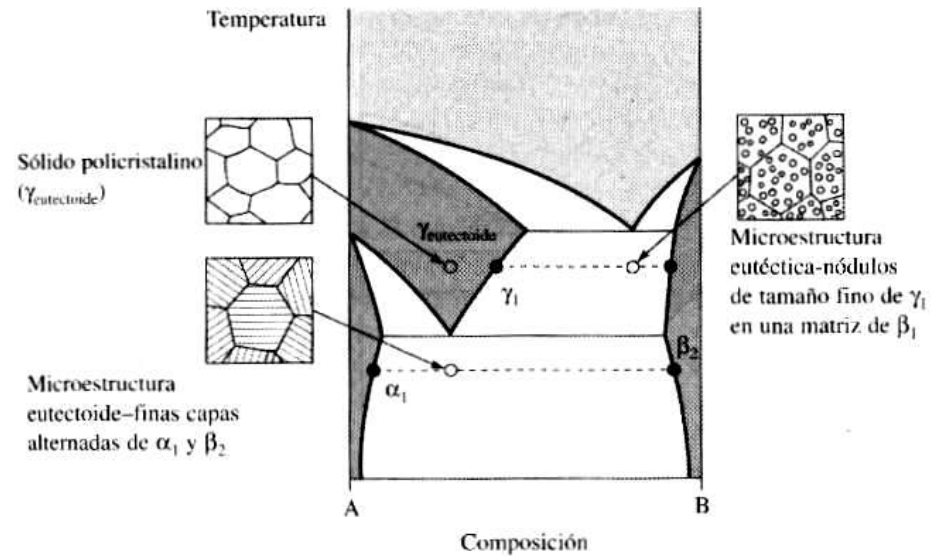




La reacción eutectoide se puede escribir como:



Este diagrama de fases eutectoide contiene tanto una reacción eutéctica como su análoga en estado sólida, una reacción eutectoide.



Microestructuras representativas del diagrama eutectoide



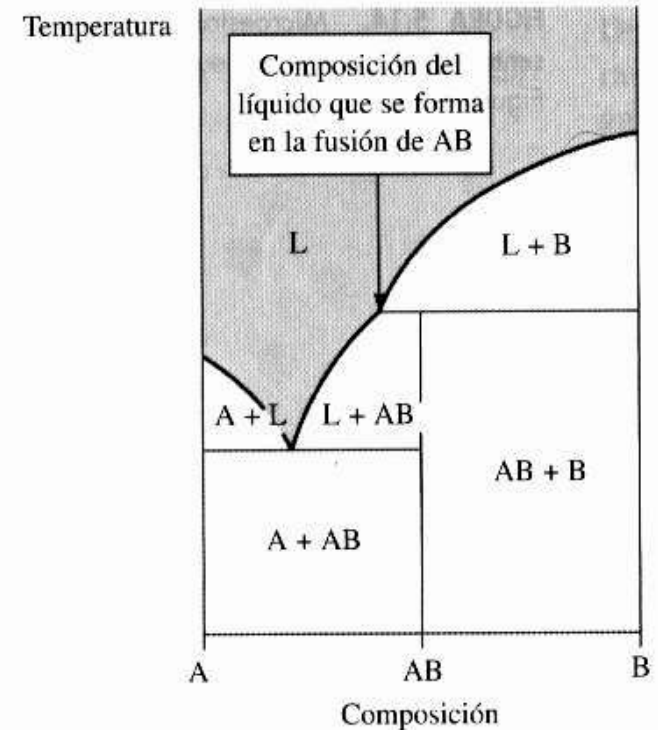
Cuando una fase cambia en otra isotérmicamente y sin ninguna modificación en composición química, se dice que es un cambio de fase congruente o una transformación congruente.

Las fases intermedias se llaman así porque son únicas y se presentan entre las fases terminales en un diagrama de fase.

Cualquier fase intermedia puede tratarse como otro componente en un diagrama de fase. Si la fase intermedia tiene un reducido intervalo de composición, como sucede en los compuestos intermetálicos y los compuestos intersticiales, entonces se represente en el diagrama como una línea vertical y se indica bajo la fórmula química del compuesto.

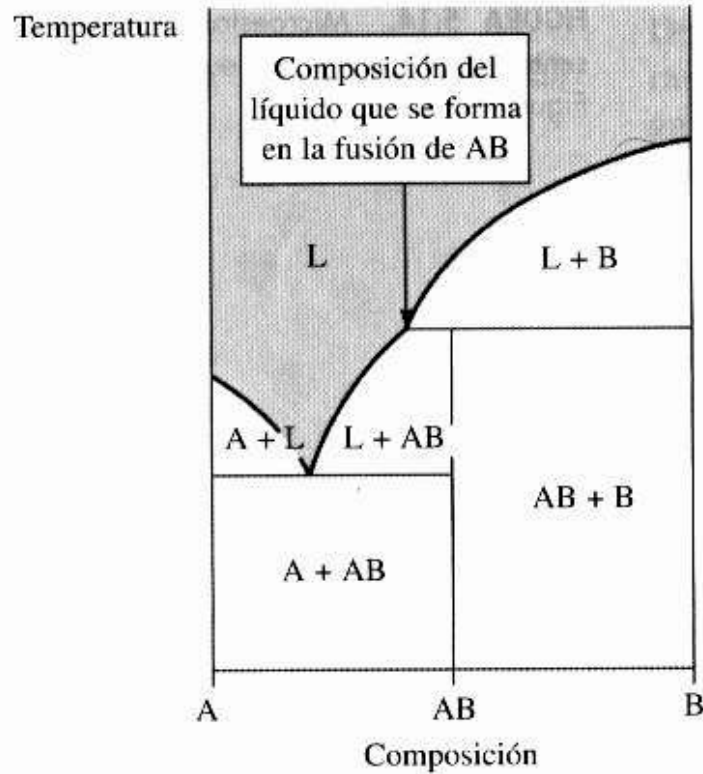
En la figura , se muestra la fase intermedia de la aleación como una línea vertical. Dado que un compuesto se indica como AB.

El sistema A-B puede separarse en dos partes independientes, una muestra las aleaciones entre A y el compuesto AB, y otra entre AB y B.

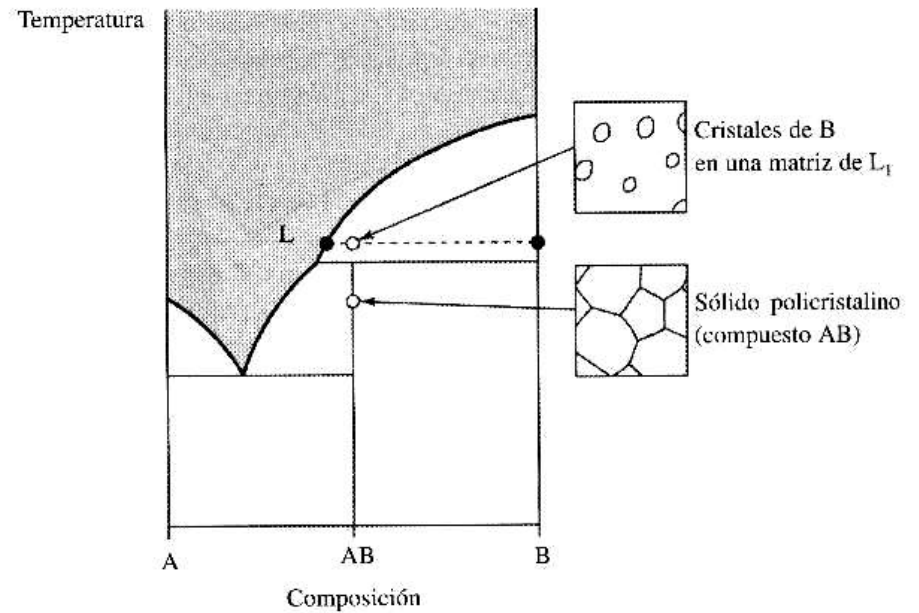




TIPO V: FORMACIÓN DE UNA FASE INTERMEDIA DE FUSIÓN CONGRUENTE.



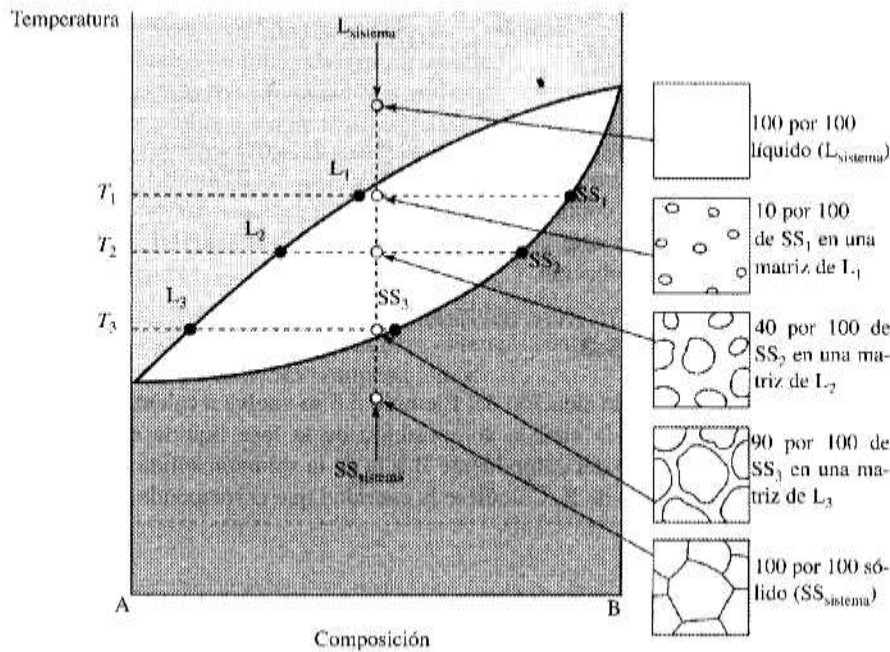
La reacción peritética se puede escribir como:



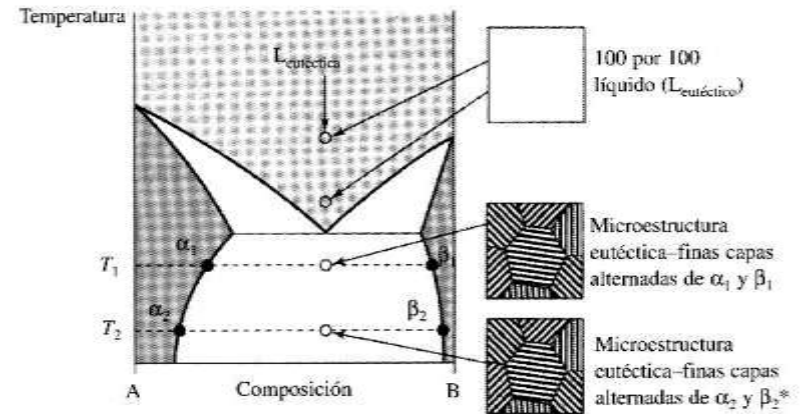
Microestructuras representativas del diagrama eutectoide



EVOLUCION DE LA MICROESTRUCTURA DURANTE EL ENFRIAMIENTO LENTO DE UNA COMPOSICION 50% A , 50% B EN UN DIAGRAMA DE FASES CON SOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO SOLIDO.



EVOLUCION DE LA MICROESTRUCTURA DURANTE EL ENFRIAMIENTO LENTO DE UNA COMPOSICION EUTÉCTICA

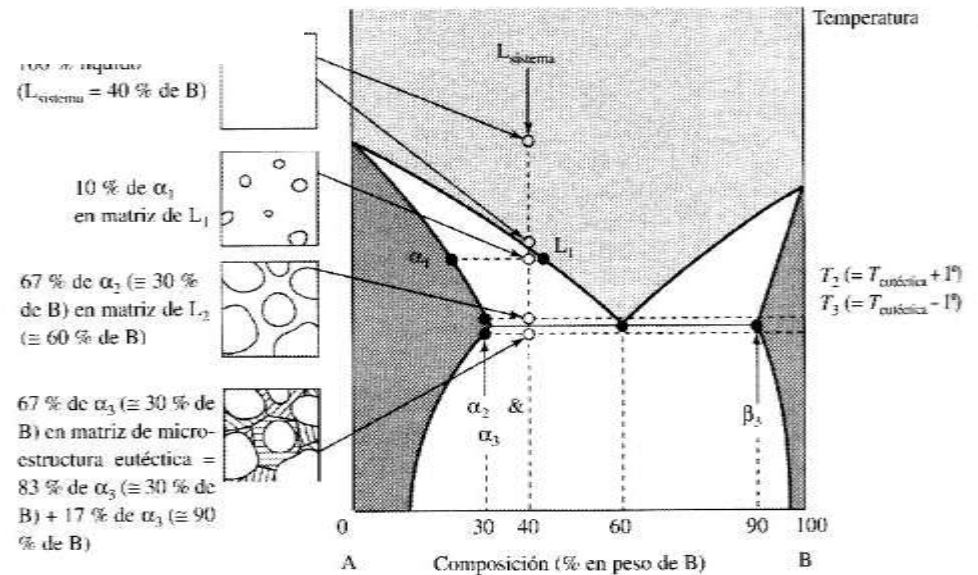
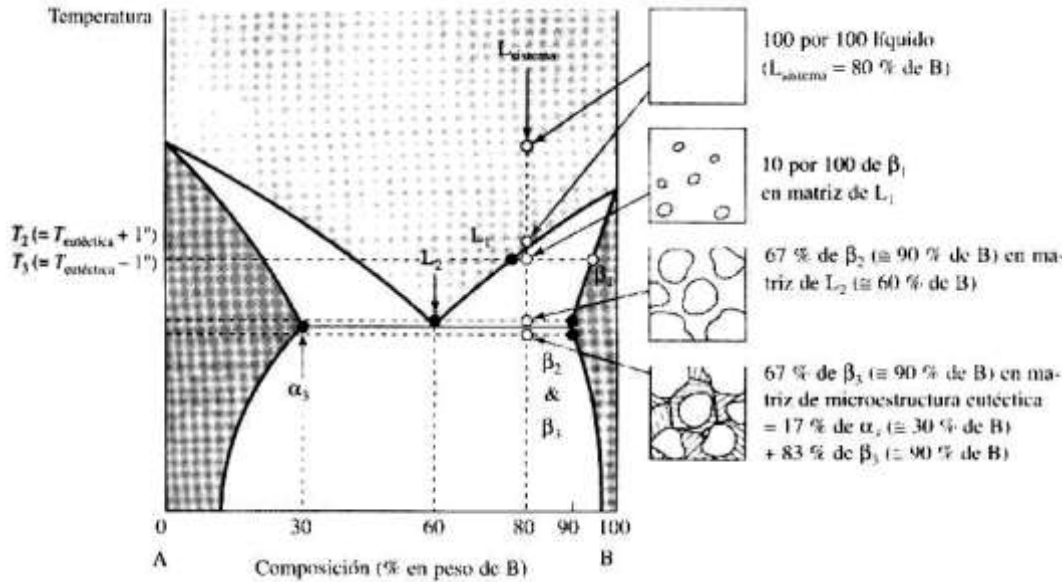


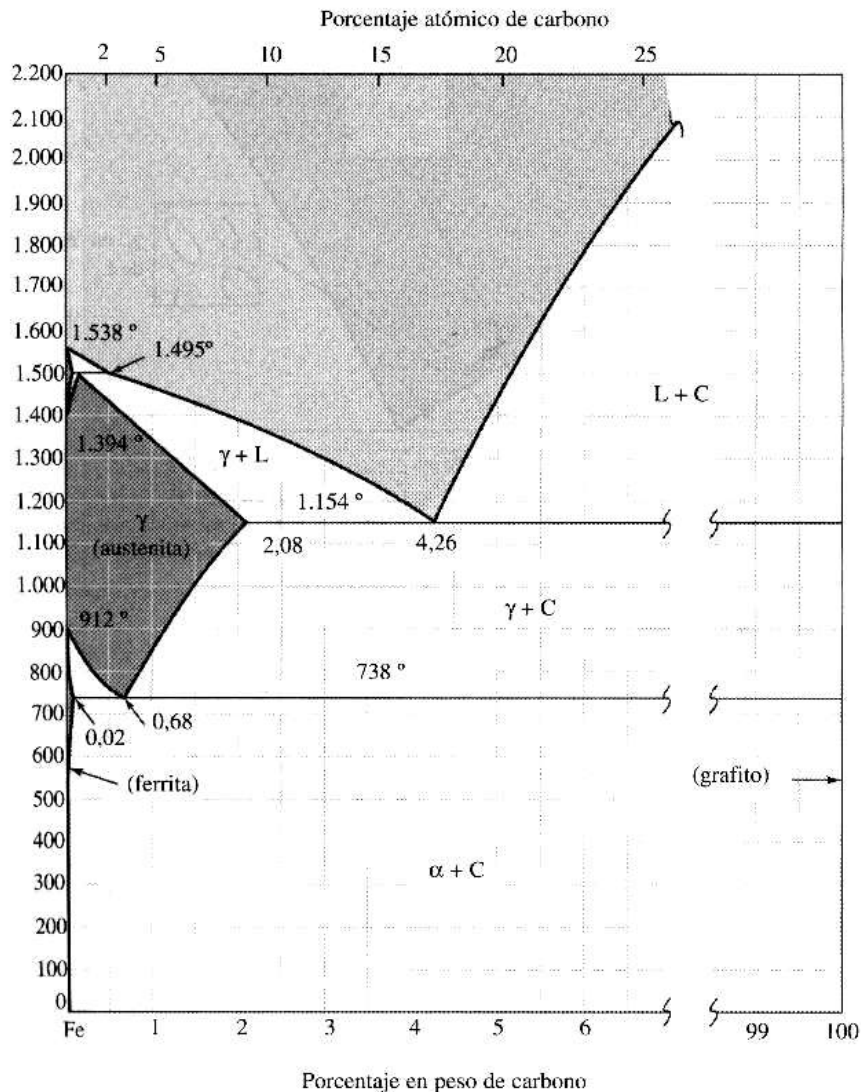
* Las únicas diferencias con respecto a la microestructura correspondiente a T_1 son las composiciones de las fases y las cantidades relativas de cada fase. Por ejemplo, la cantidad de b será proporcional a:

$$\frac{x_{eutética} - x_{\alpha}}{x_{\beta} - x_{\alpha}}$$



EVOLUCION DE LA MICROESTRUCTURA DURANTE EL ENFRIAMIENTO LENTO DE UNA COMPOSICION EUTECTICA





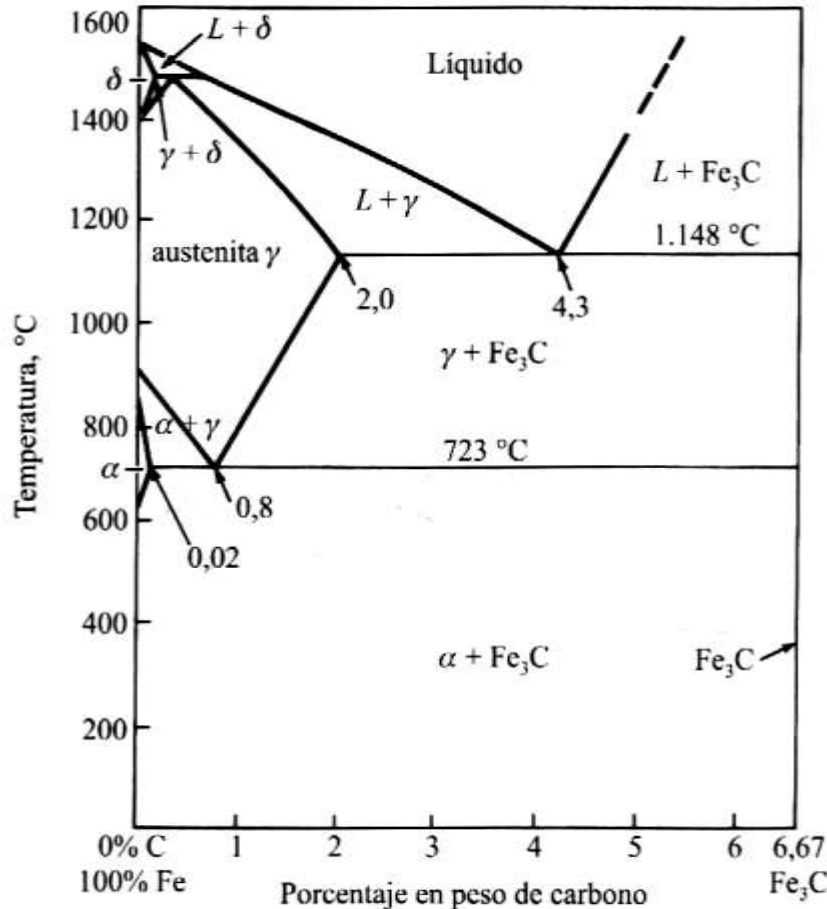
CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES:

La Temperatura a que tienen lugar los cambios alotrópicos en el hierro está influida por los elementos de aleación, de los cuales el más importante es el Carbono.

En el siguiente diagrama se muestra la porción de interés del Sistema de Aleación Hierro-Carbono. Esta es la parte entre hierro puro y un componente intersticial, carburo de hierro Fe₃C que contiene 6,67 % de Carbono por peso.

El Carburo de Hierro se llama fase metaestable ya que es un hecho que el componente carburo de hierro se descompondrá en Hierro y Carbono (Grafito), lo cual tomará un tiempo muy largo a temperatura ambiente, y aún a 1300 °F tarda varios años en formar grafito.

Ahora bien aunque representa condiciones metaestables, puede considerarse representante de cambios en equilibrio, bajo condiciones de enfriamiento y calentamiento relativamente lentas.



CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES:

El diagrama contiene las siguientes fases sólidas: ferrita α , austenita γ cementita $Fe_3 C$ y ferrita δ .

Ferrita α

1. Solución Sólida Intersticial de C en Fe α (b.c.c.).
2. Solubilidad máxima en estado sólido del 0,0218 % C a 727 °C y disminuye a 0.005 % a 0 °C.
3. Es la estructura más suave del diagrama.

Austenita γ

1. Solución Sólida Intersticial de C en Fe γ (f.c.c.).
2. Solubilidad máxima en estado sólido de carbono es del 2.11 % C a 1148°C y disminuye a un 0.8 % a 726 °C
3. Generalmente no es estable a temperatura ambiente.

Cementita $Fe_3 C$

1. Compuesto intermetálico $Fe_3 C$
2. Tiene una composición del 6.67% en carbono y 93,33 % en hierro
3. Estructura cristalina ortorrómbica
4. Es duro y frágil

Ferrita δ .

1. Solución sólida intersticial de carbono en Fe δ (b.c.c)
2. Solubilidad máxima en estado sólido de carbono es del 0.09 % C a 1495°C

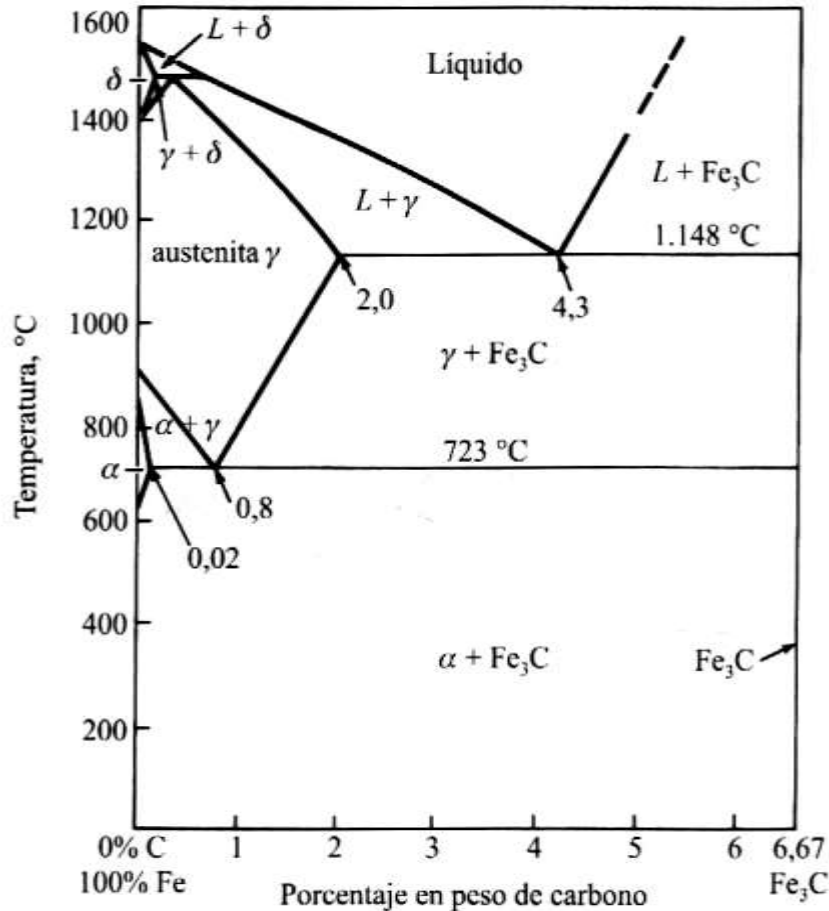
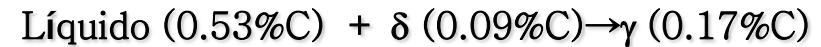


Diagrama de fases hierro-carburo de hierro

Reacciones invariantes en el diagrama de fases Fe-Fe₃C

Reacción Peritética:

Un líquido de 0,53% C se combina con ferrita δ de un 0.09% para formar austenita γ del 0.17%. Esta reacción que tiene lugar a 1495° C, se puede escribir como:



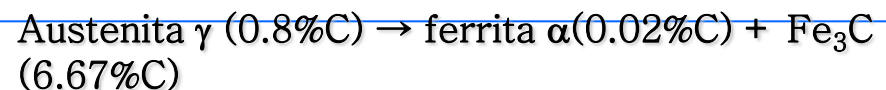
Reacción Eutéctica:

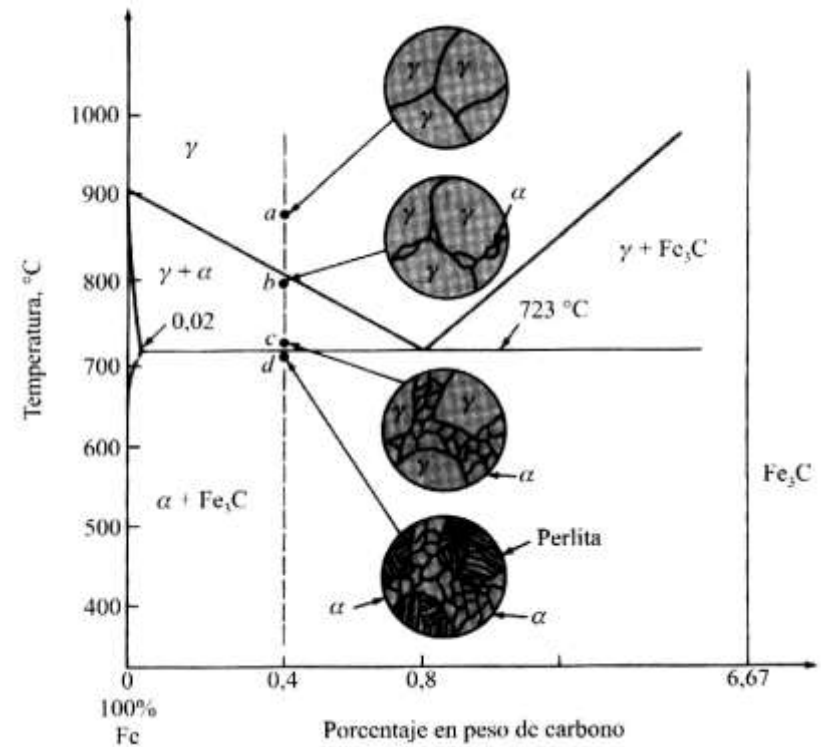
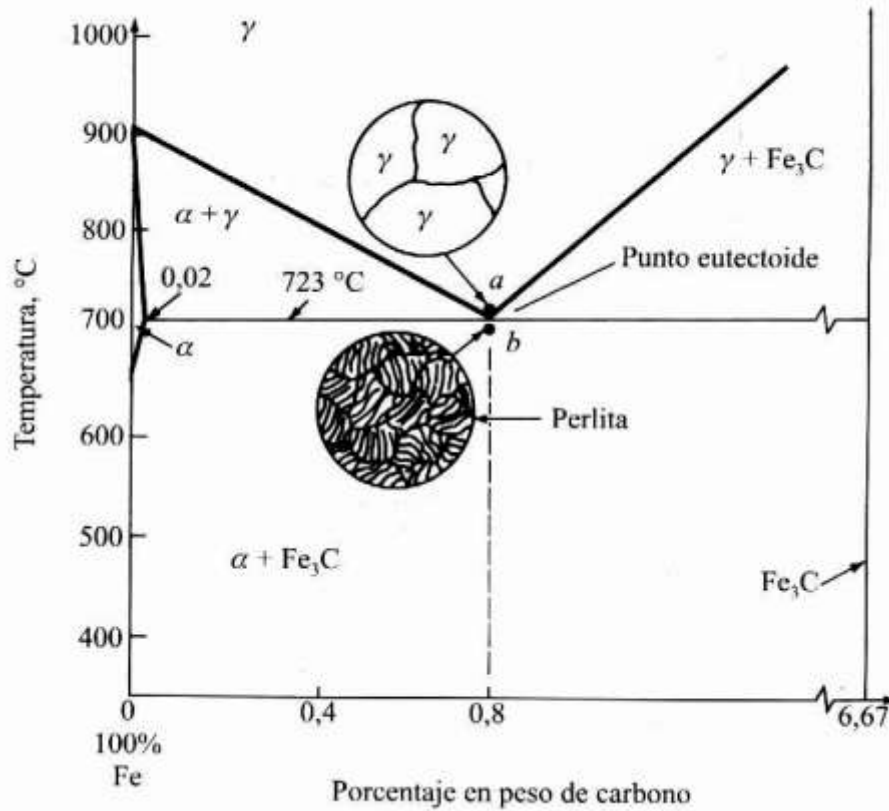
Un líquido de 4.3% C forma austenita γ del 2.08% C y el compuesto intermetálico Fe_3C que contiene 6.67% C. Esta reacción que tiene lugar a 1148° C, se puede escribir como:



Reacción Eutectoide:

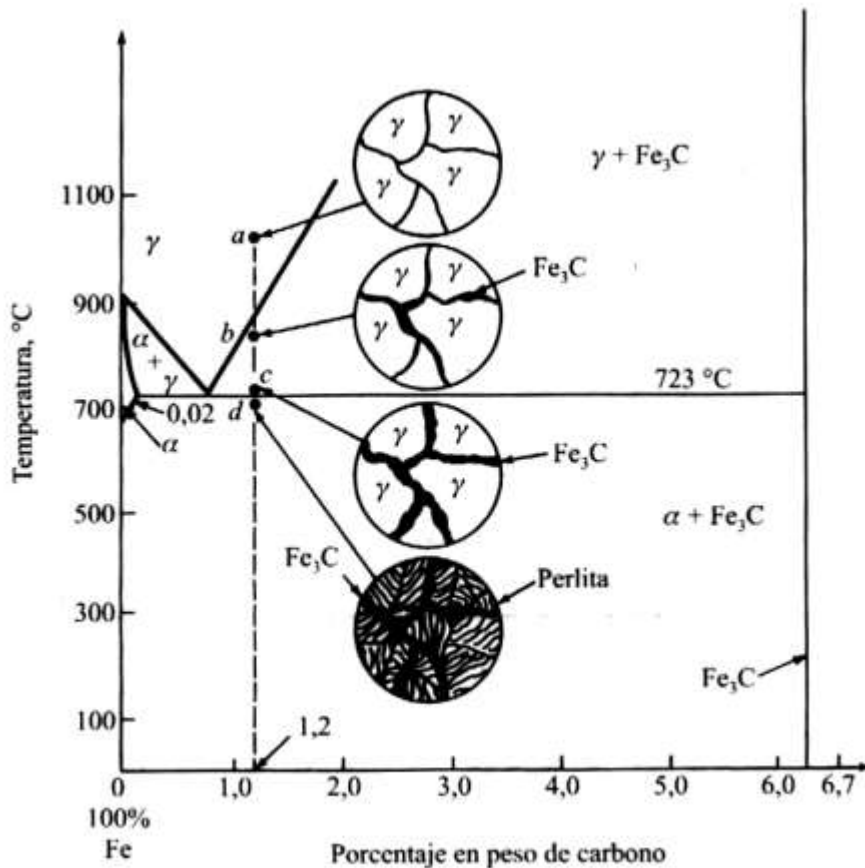
La austenita sólida de 0.8% C produce ferrita α con 0.02 % C y Fe_3C cementita con 6.67% C. Esta reacción que tiene lugar a 723° C, se puede escribir como:





Transformación de un acero eutectoide (0.8% C) en condiciones de enfriamiento lento

Transformación de un acero ordinario al carbono hipoeutectoide de 0.4% enfriado lentamente.



Transformación de un acero ordinario al carbono hipereutectoide de 1.2 % enfriado lentamente.

Microestructura de un acero hipereutectoide de 1.2 % C enfriado lentamente a partir de la región austenítica. En esta grafica la cementita proeutectoide aparece como el constituyente blanco, que se ha formado en los bordes de los granos austeníticos previos.



REGLA I: COMPOSICION QUIMICA DE LAS FASES

Para determinar la composición química real de las fases de una aleación, en equilibrio a cualquier temperatura en una región bifásica, se debe trazar una línea horizontal para la temperatura, llamada **línea vínculo**, a las fronteras del campo.

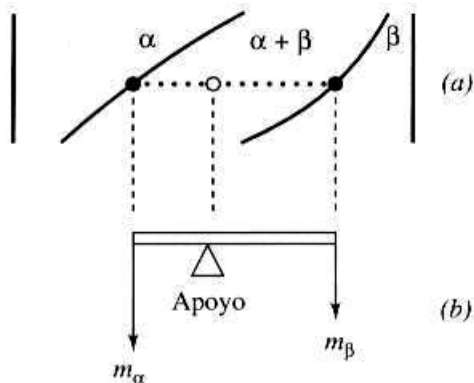
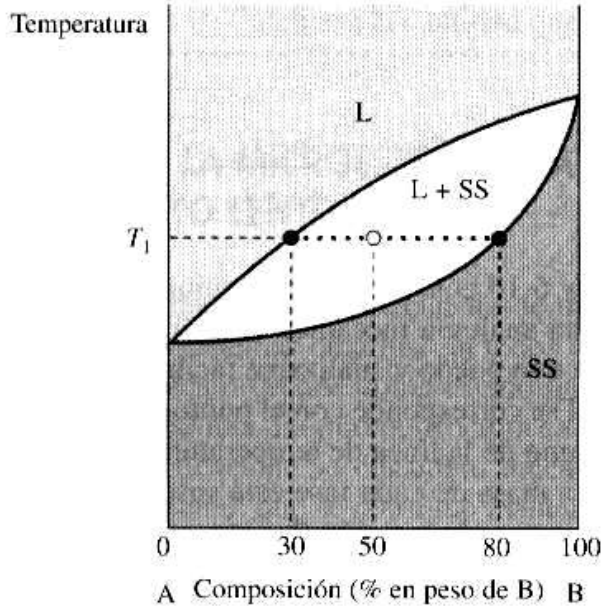
Estos puntos de intersección se abaten a la línea base y la composición se lee directamente.

REGLA II: CANTIDADES RELATIVAS DE CADA FASE

Para determinar las cantidades relativas de las dos fases en equilibrio, a cualquier temperatura específica en una región bifásica, se debe trazar una línea vertical que representa la aleación y una línea horizontal (como la temperatura), a los límites del campo.

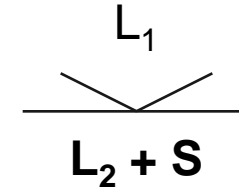
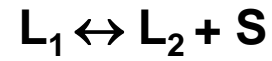
La línea vertical dividirá a la horizontal en dos partes cuyas longitudes son inversamente proporcionales a la cantidad de las fases presentes. Esta se conoce como la **regla de la palanca**.

El punto donde la línea vertical interseca a la horizontal se considerará como eje de oscilación de un sistema de palanca. Las longitudes relativas de los brazos de palanca multiplicadas por las cantidades de las fases presentes deben balancearse.

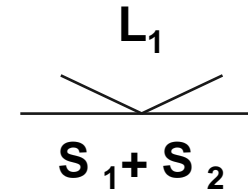




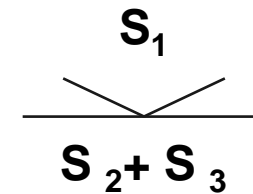
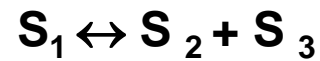
MONOTECTICA



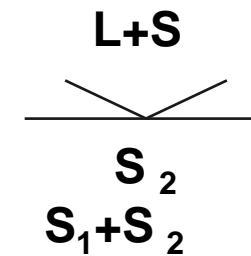
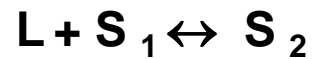
EUTÉCTICA



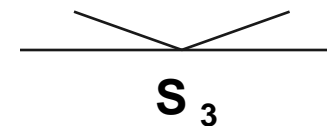
EUTECTOIDE

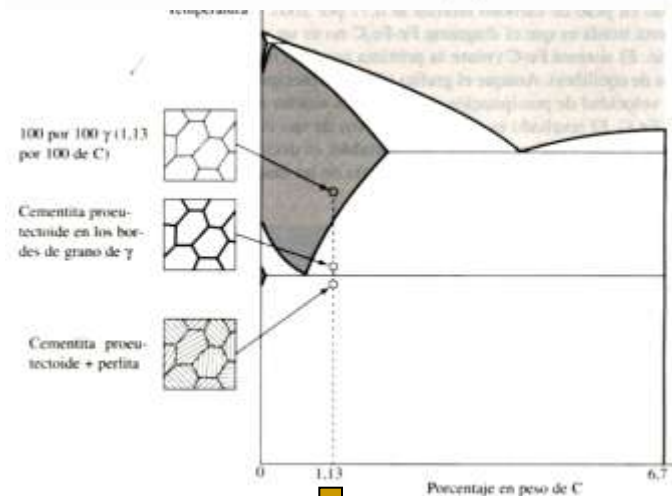
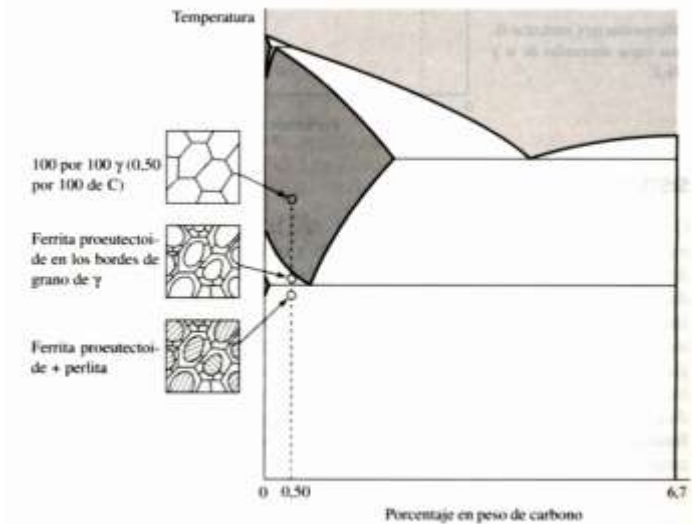


PERITÉCTICA



PERITECTOIDE



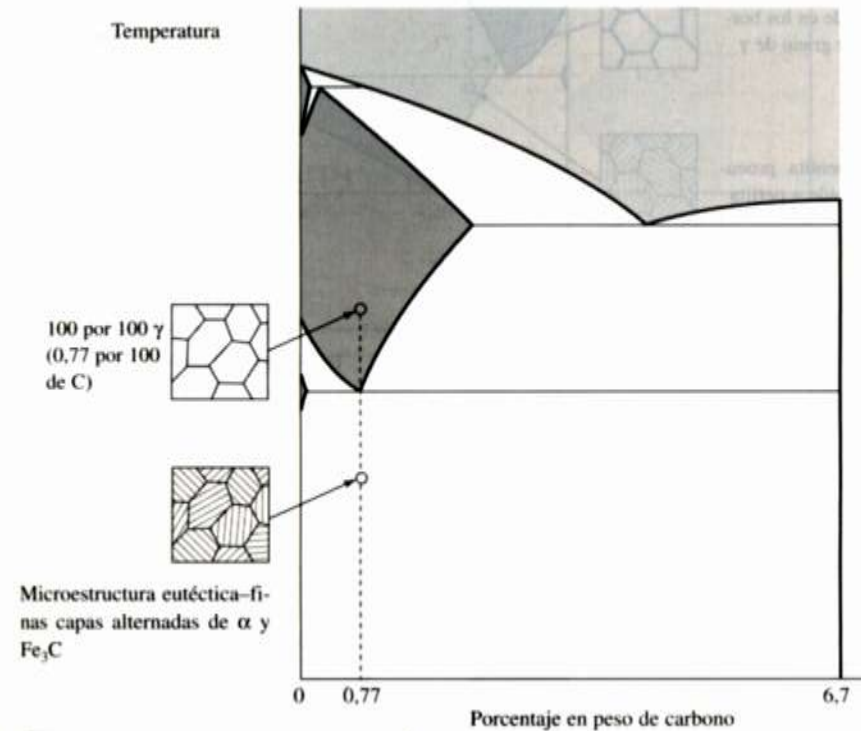


↓

Evolución microestructural de un acero hipereutectoide (1.13 % en peso de Carbono)



Evolución microestructural de un acero hipoeutectoide (0.50% en peso de Carbono)



Evolución microestructural de un acero eutectoide (0.77% en peso de Carbono)

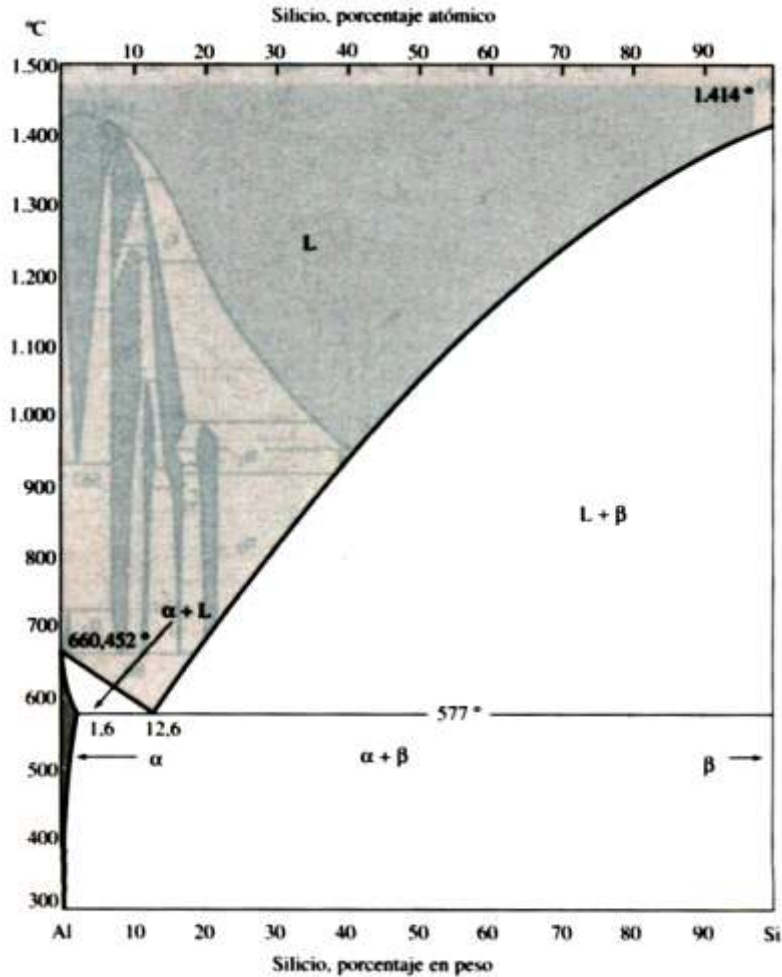


DIAGRAMA DE FASES Al-Si.

Sistema eutéctico Al-Si, existe una pequeña zona de solubilidad sólida. La región rica en aluminio describe el comportamiento de algunas aleaciones importantes de aluminio.

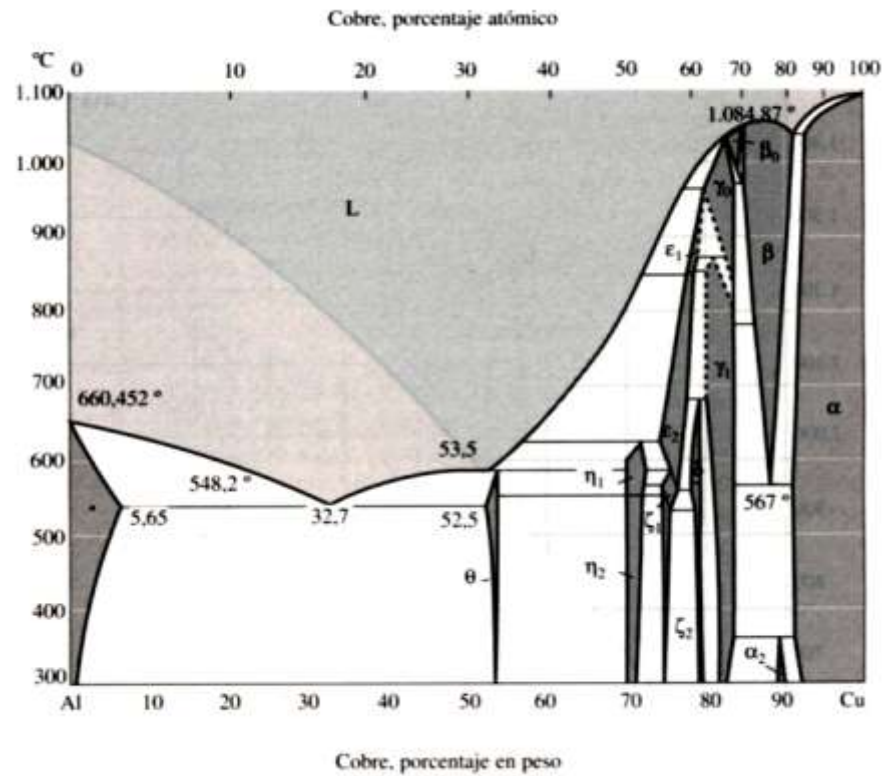


DIAGRAMA DE FASES Al-Cu

Diagrama complejo que puede analizarse como un diagrama eutéctico simple en la región de elevado contenido en aluminio.

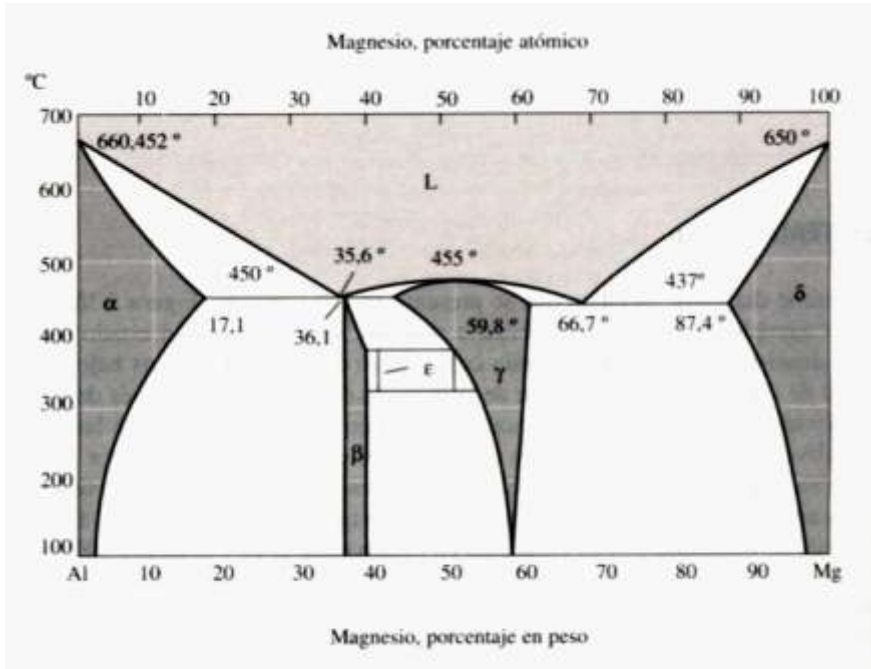


DIAGRAMA DE FASES Al-Mg.

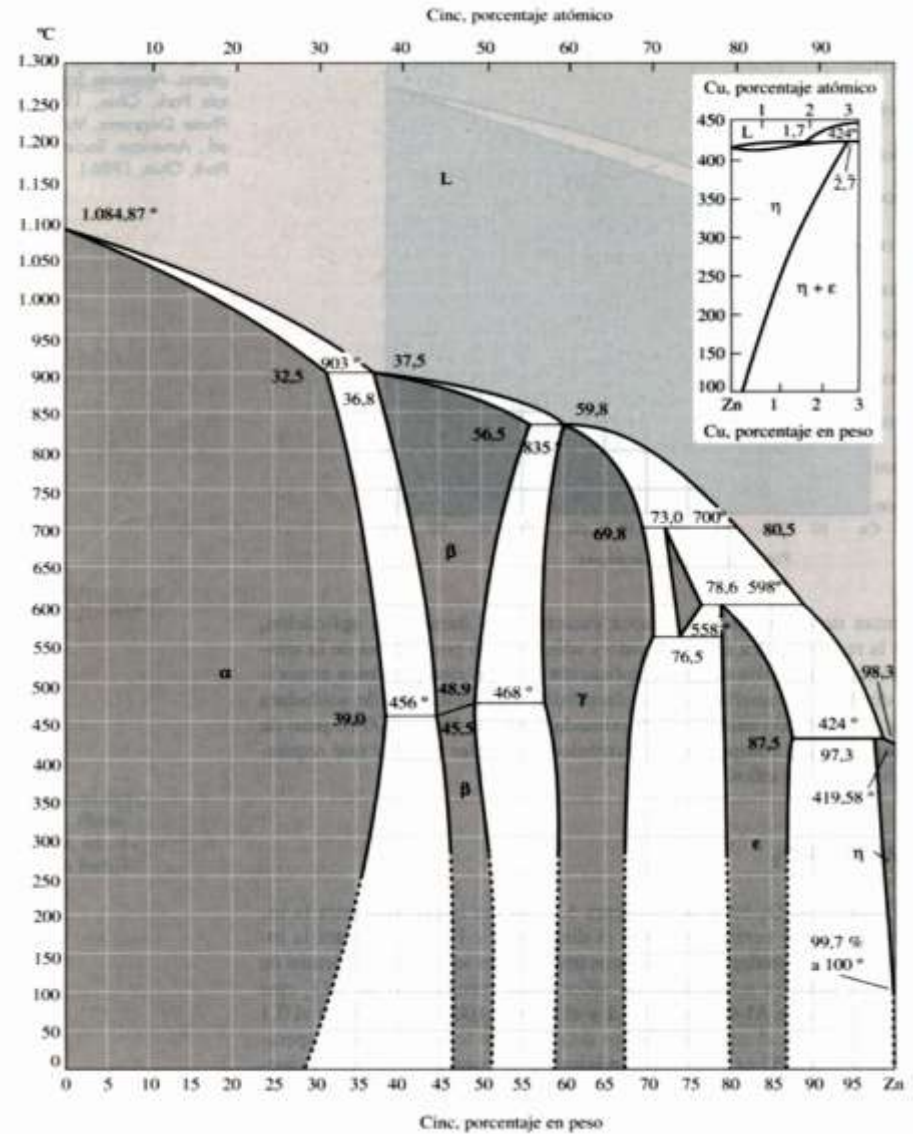


DIAGRAMA DE FASES Cu-Zn



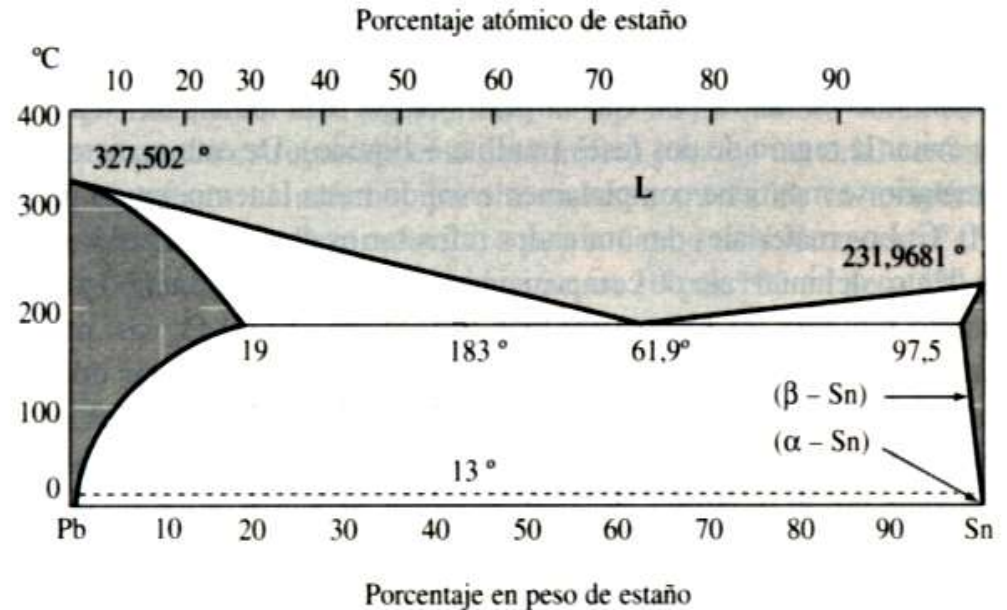
DIAGRAMA DE FASES Pb-Sn

Diagrama eutéctico binario con solubilidad parcial en estado sólido. Las aleaciones de soldadura caen dentro de este sistema.

Las aleaciones de soldadura con menos del 5% de peso en Sn se emplea sellando recipientes, revestimientos, unión de metales y aplicaciones con temperaturas de servicio que excedan los 120°C.

Las aleaciones entre un 10 y 20% en peso de Sn se emplean en sellar radiadores de automóviles y para rellenar juntas y hendiduras en los automóviles.

Las aleaciones entre un 40 y 50 % en peso de Sn presentan una consistencia pastosa durante su aplicación y su aplicación va desde la fontanería hasta la electrónica.



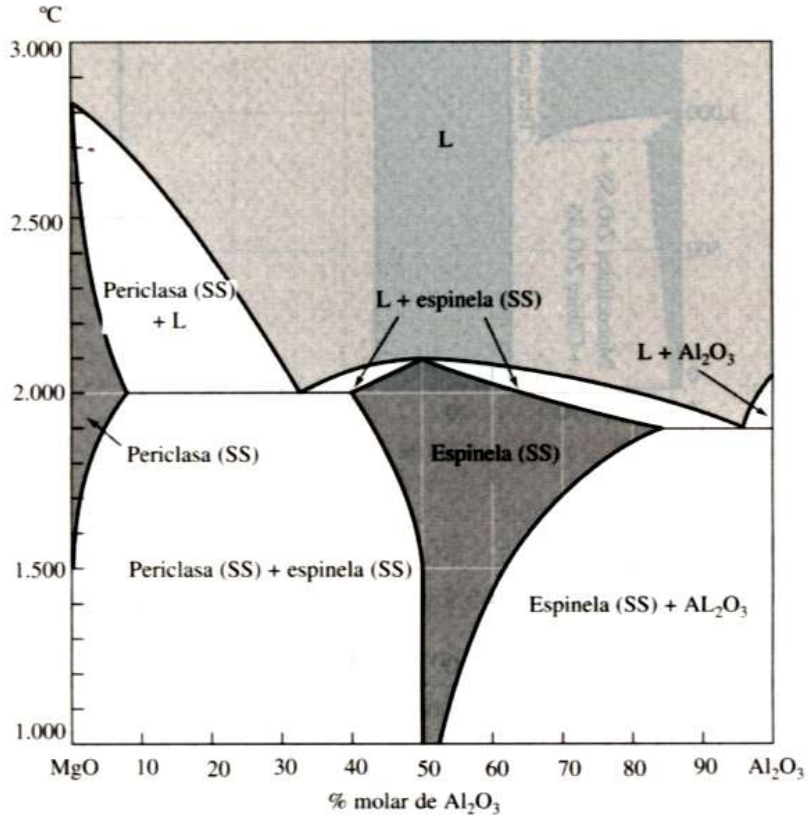


DIAGRAMA DE FASES MgO- Al_2O_3

Diagrama que incluye el compuesto intermedio, espinela $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (Espinela) o MgAl_2O_4 , con extenso rango de de solución sólida. Las espinelas refractarias son muy utilizadas en la industria.

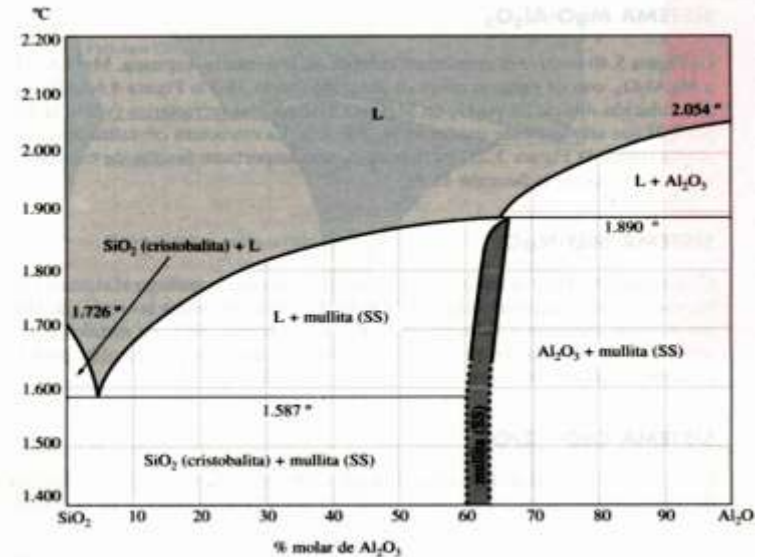


DIAGRAMA DE FASES Al_2O_3 - SiO_2

Diagrama importante en la industria de los materiales cerámicos.

Los ladrillos refractarios de sílice están compuestos de SiO_2 casi puro con Al_2O_3 entre 0.1 y 0.6% molar.

Los de arcilla comunes están localizados en el intervalo de un 16 a 32% molar de Al_2O_3 . Su utilidad como elementos estructurales en el diseño de hornos esta limitada por una temperatura eutéctica de 1587°C.

La mullita es un compuesto intermedio $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

El Al_2O_3 casi puro representa la mas alta capacidad refractaria de los materiales pertenecientes al sistema Al_2O_3 .