

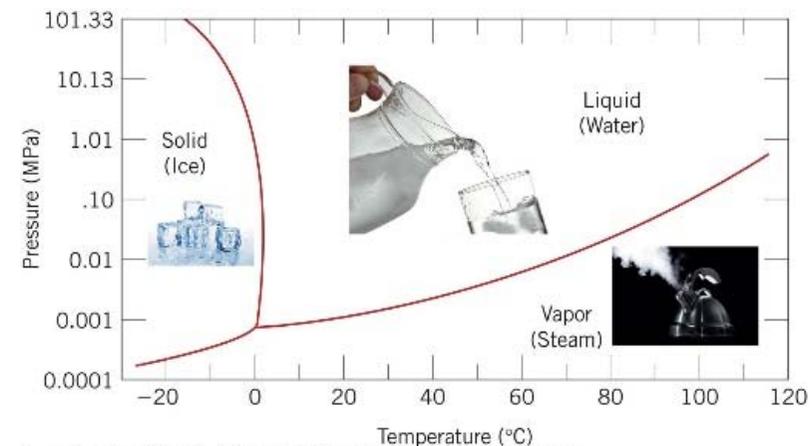
# ÍNDICE

9.1. La regla de las fases

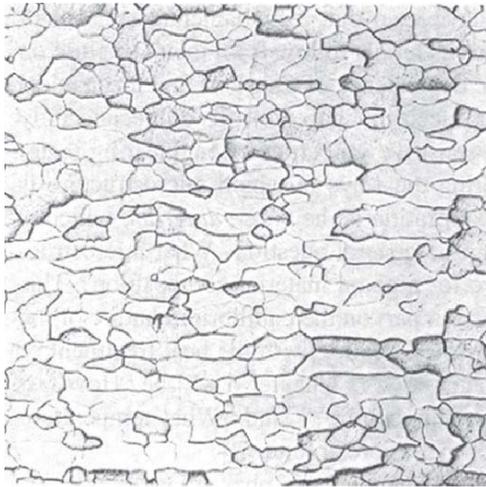
9.2. El diagrama de fases

9.3. La regla de la palanca

9.4. Evolución de la micro estructura durante el enfriamiento lento



## 9.1- La regla de las fases

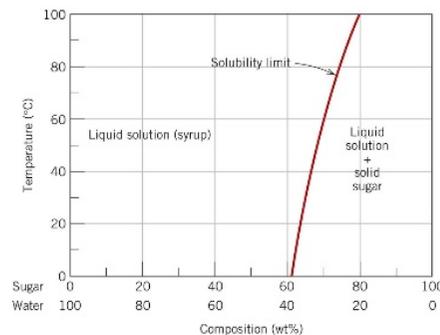


Microestructura monofásica correspondiente al molibdeno comercialmente puro, 200 x . Aunque esta microestructura está compuesta de muchos granos, cada grano tiene la misma composición uniforme.

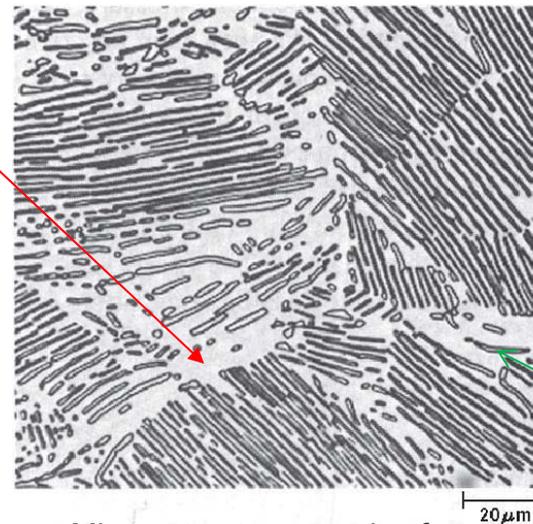
Una **fase** es una porción de microestructura homogénea desde el punto de vista químico y estructural.

Una microestructura compuesta por una sola fase puede ser policristalina, debe cumplirse la condición de que cada grano cristalino difiera en la orientación cristalográfica y no en la composición química.

Un **componente**, es cada una de las distintas sustancias químicas de las cuales está formada la fase.



Límite de solubilidad

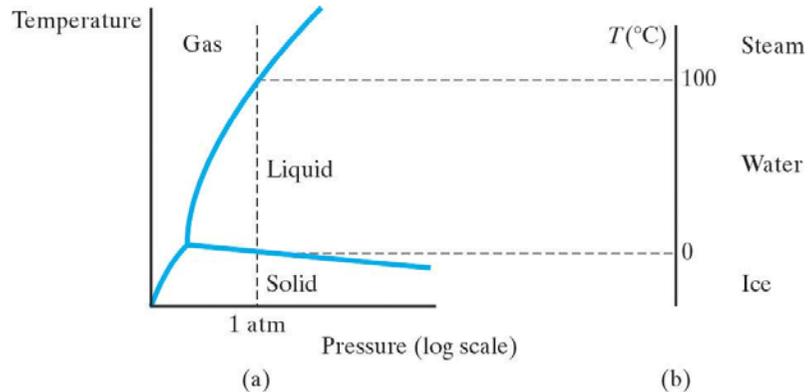


Microestructura con dos fases correspondiente a la perlita en un acero con 0.8 por ciento en peso de C, 500 x .

Este contenido en carbono es una media del contenido en carbono de cada uno de las capas alternadas de ferrita y de cementita. Las láminas más estrechas corresponden a la fase cementita.

Cementita, compuesto  $Fe_3C$  con un porcentaje en peso de carbono menor del 6,7

## 9.1- La regla de las fases



Los **grados de libertad** son el número de variables independientes del sistema. Un metal puro en las condiciones correspondientes a su punto de fusión no tiene ningún grado de libertad. En esta condición, o **estado**, el metal existe en forma de dos fases en equilibrio, simultáneamente en fase líquida y sólida.

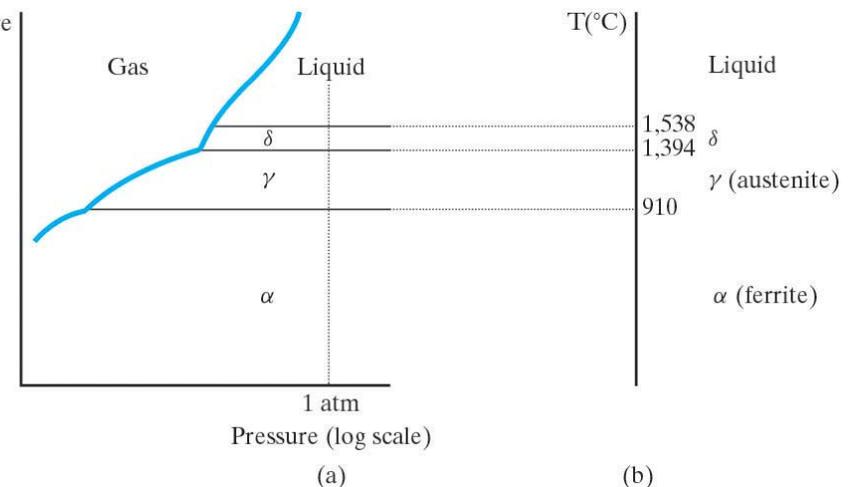
Cualquier incremento en la temperatura cambiará el estado de la microestructura.

Las **variables de estado** sobre las cuales el ingeniero de materiales tiene control para establecer una determinada microestructura son la temperatura, presión y composición.

La relación la microestructura y estas variables de estado viene dada por la **regla de las fases de Gibbs**, que, sin deducción, se expresa como:

$F=C-P+2$ ; donde  $F$  es el numero de grados de libertad,  $C$  el número de componentes y  $P$  el número de fases.

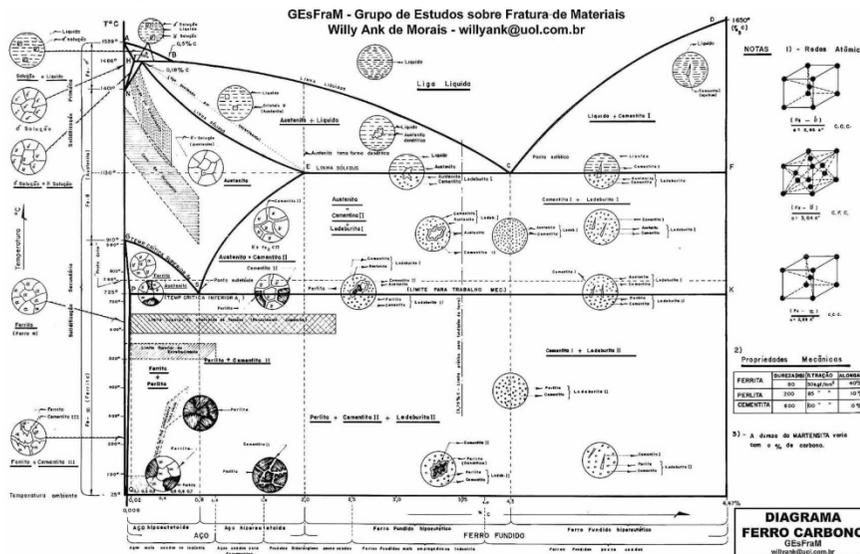
Para sistemas condensados,  $F=C-P+1$



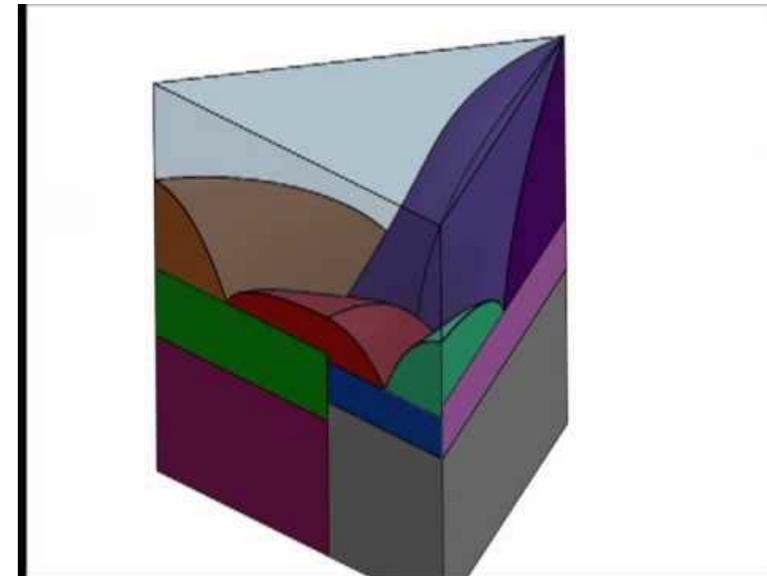
## 9.2- El diagrama de fases.

Un **diagrama de fases** es cualquier representación gráfica de las variables de estado asociadas con las microestructuras a través de la regla de las fases de Gibbs.

Los diagramas de fases de uso común entre los ingenieros de materiales son los **diagramas binarios**, que representan sistemas de dos componentes ( $C = 2$  en la regla de las fases de Gibbs):



Los **diagramas ternarios**, que representan sistemas de tres componentes ( $C = 3$ ).



Los diagramas de fases deben ser considerados como mapas. Los diagramas binarios son mapas de las fases en equilibrio asociadas a distintas combinaciones de temperatura y composición. Ilustran los cambios experimentados por las fases y por la microestructura asociada como consecuencia de los cambios en las variables de estado (temperatura y composición).

## 9.2- El diagrama de fases. Solubilidad total en estado sólido

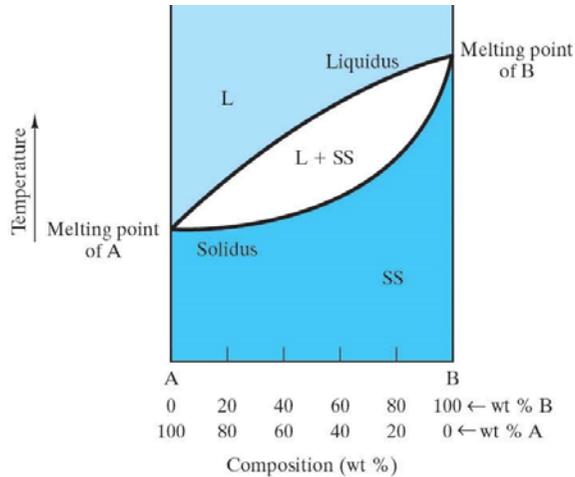
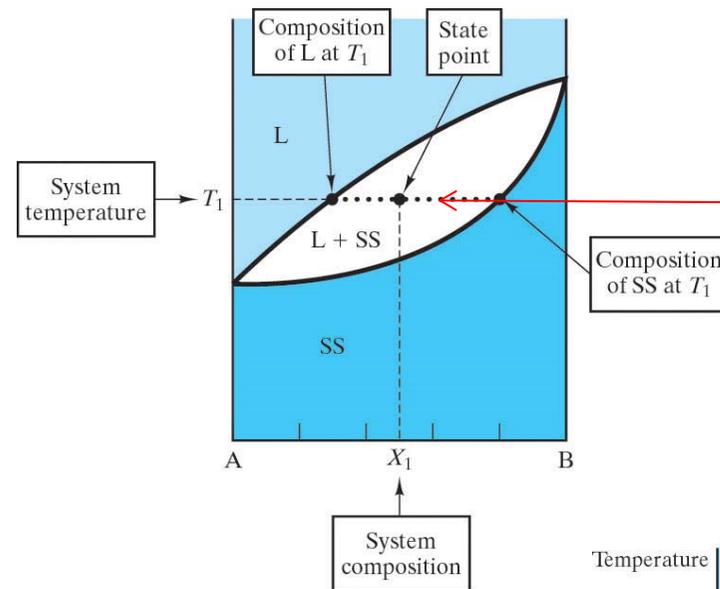
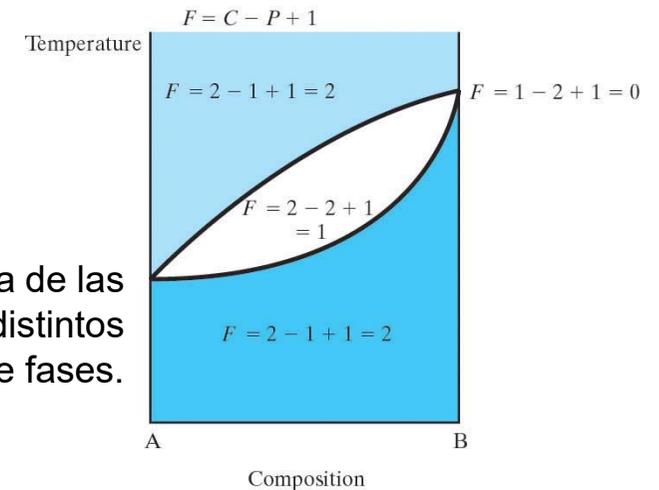


Diagrama de fases binario que muestra un caso de solubilidad total en estado sólido. El campo de fase líquida se identifica mediante una *L* y la solución sólida se designa mediante *SS*. Nótese que la región de coexistencia de dos fases está referenciada por *L + SS*.

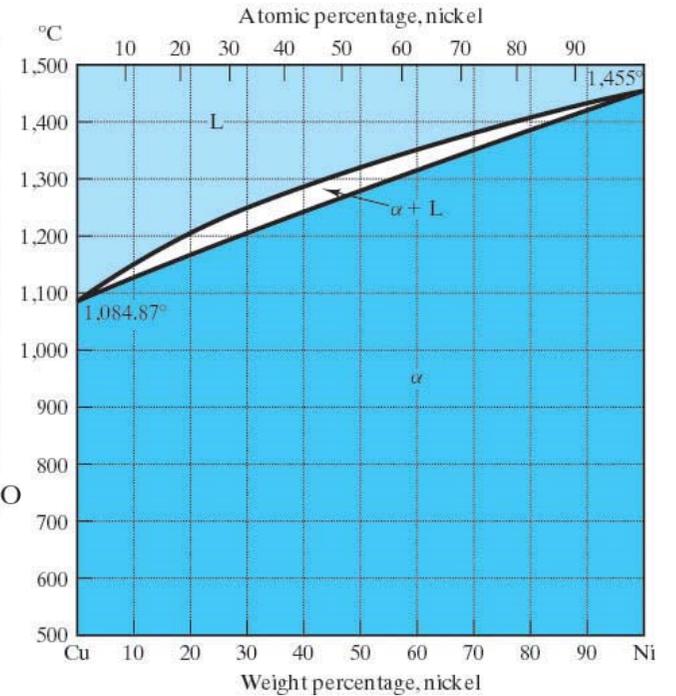
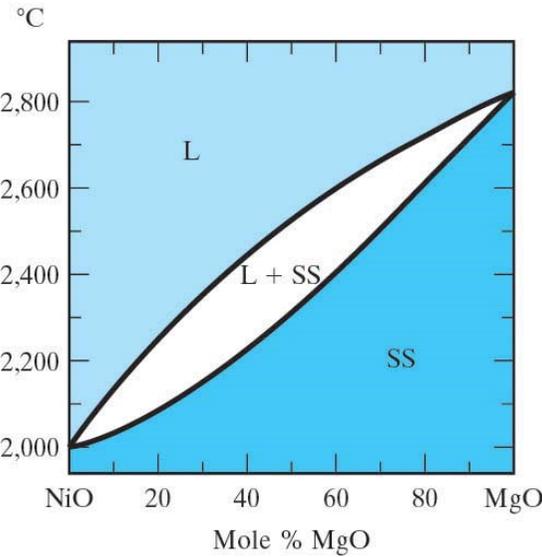
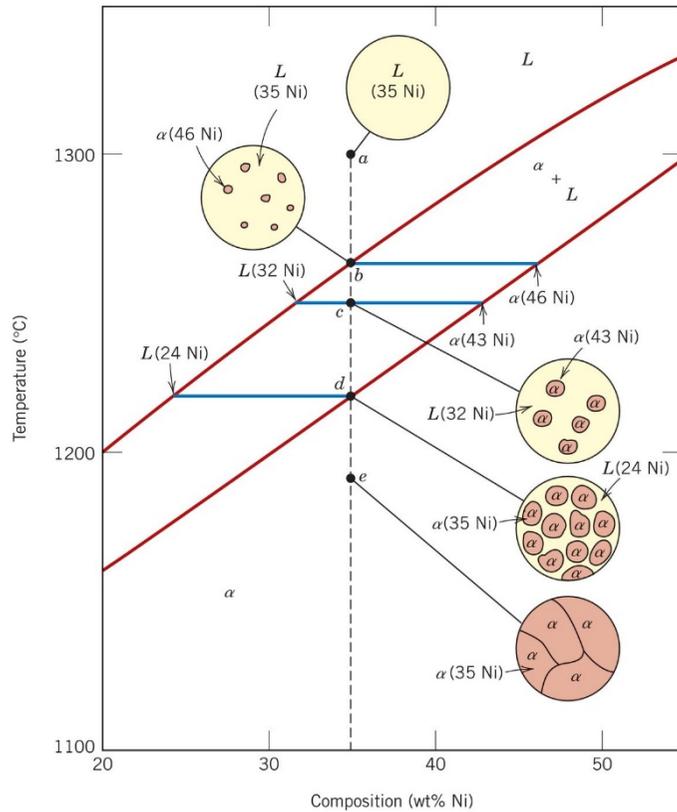


Las **composiciones** de las fases en el interior de una región bifásica se determinan mediante una línea de temperatura constante (la línea horizontal que conecta las composiciones de las fases a la temperatura del sistema).

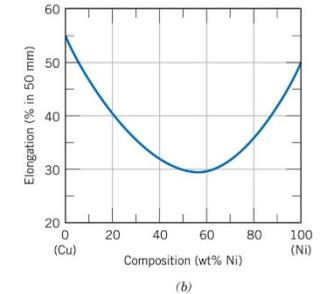
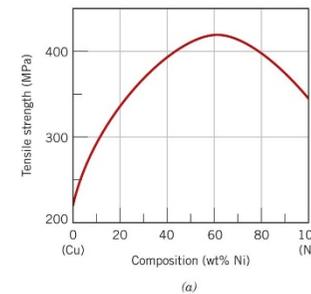
Aplicación de la regla de las fases de Gibbs a distintos puntos del diagrama de fases.



## 9.2- El diagrama de fases. Solubilidad total en estado sólido



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



## 9.2- El diagrama de fases.

### Diagrama eutéctico con insolubilidad total en estado sólido

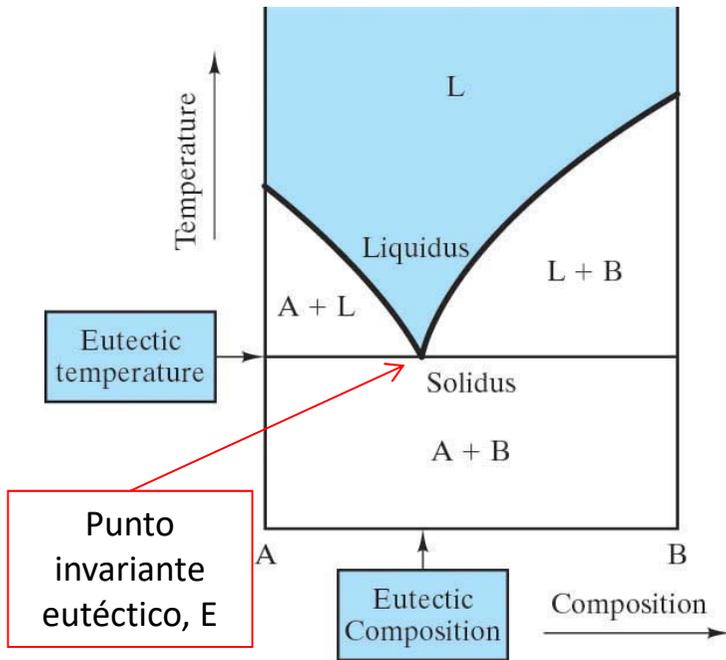
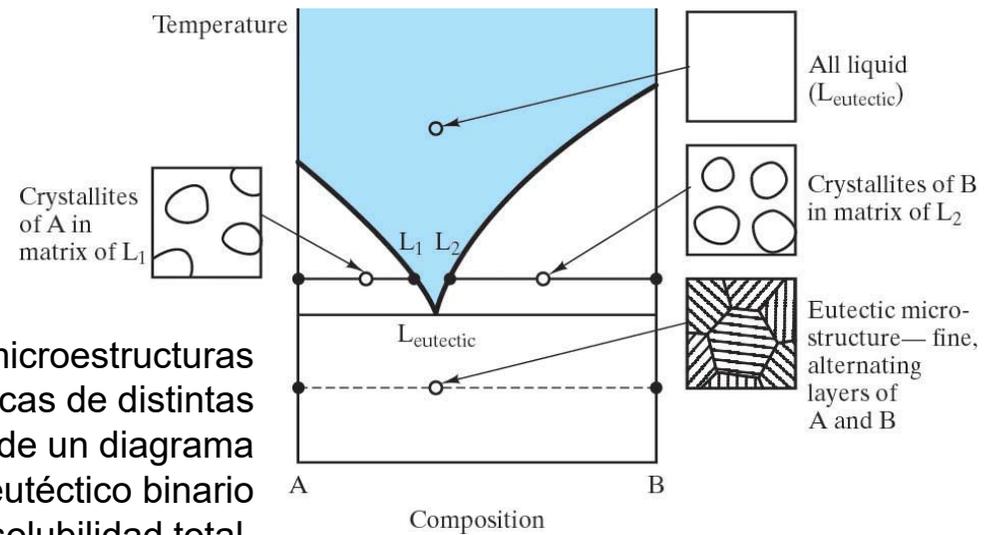
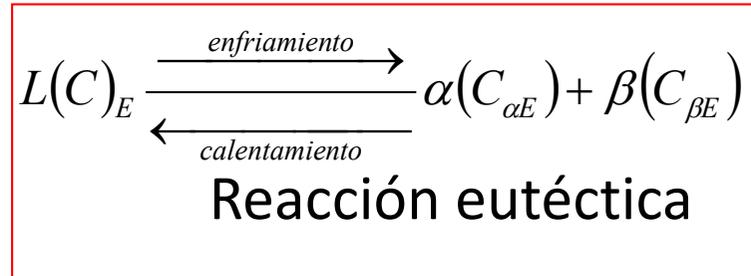


Diagrama de fases eutéctico binario que muestra una insolubilidad total en estado sólido.



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

## 9.2- El diagrama de fases. Diagrama eutéctico con solubilidad parcial en estado sólido

Diagrama de fases Al-Si.

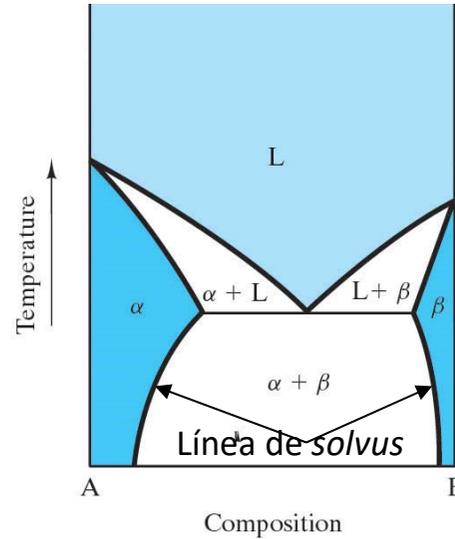
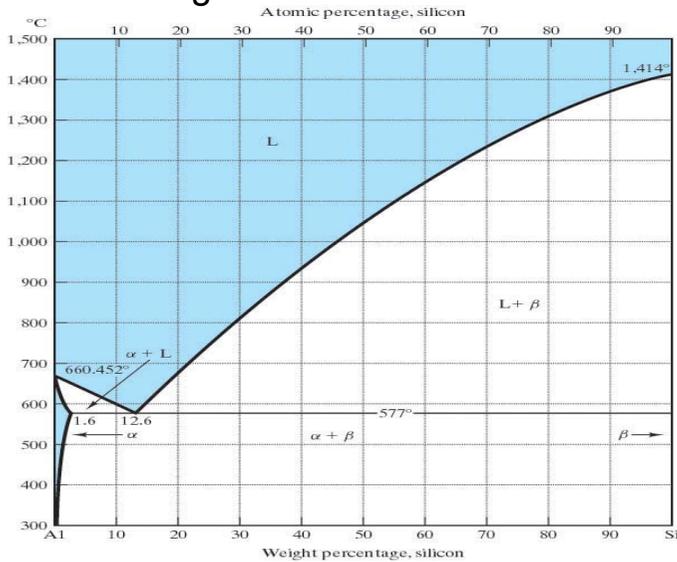
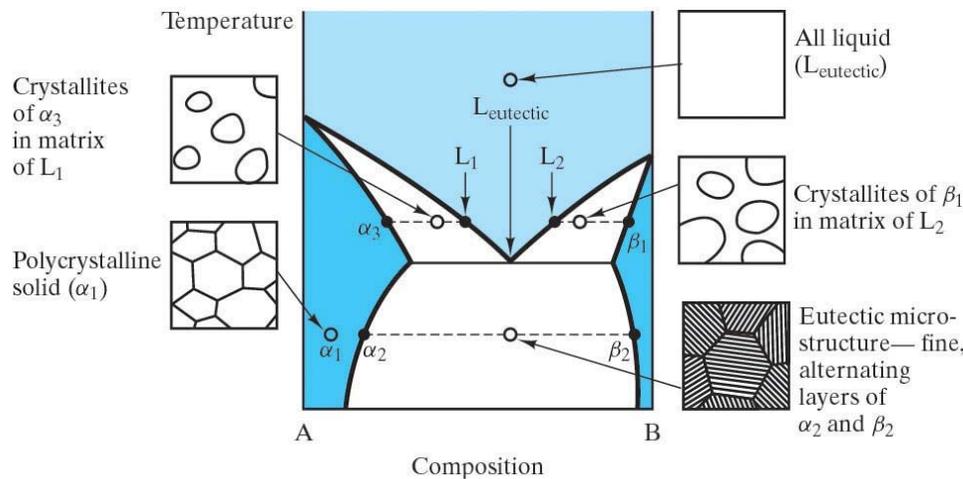


Diagrama eutéctico binario con solubilidad parcial en estado sólido. La única diferencia respecto a la insolubilidad total es la presencia de las zonas de solución sólida  $\alpha$  y  $\beta$ .



Diversas microestructuras características de distintos regiones del diagrama eutéctico binario con solubilidad parcial en estado sólido.

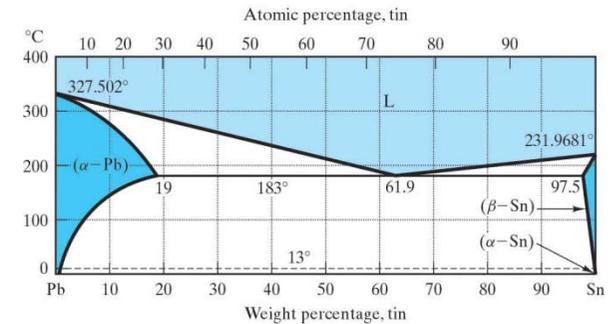


Diagrama de fases Pb-Sn.

## 9.2- El diagrama de fases. Diagrama eutectoide

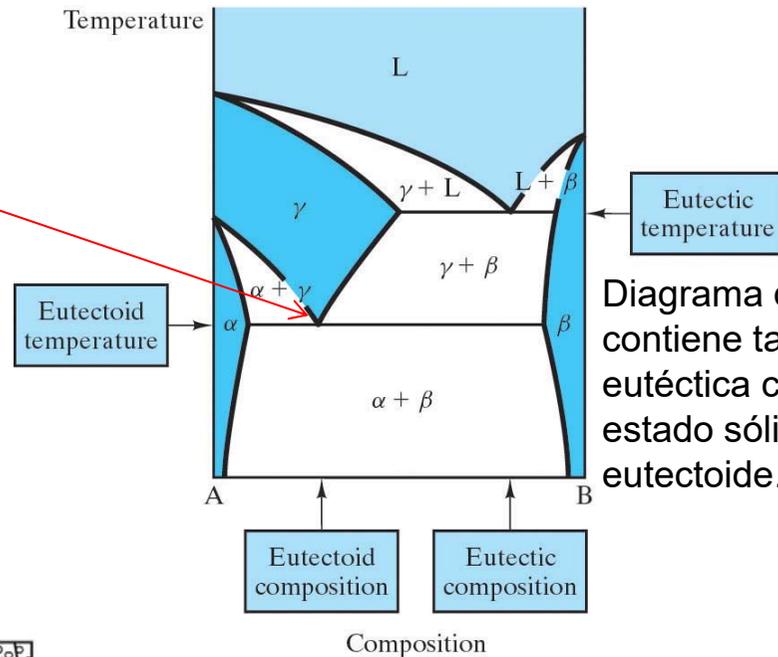
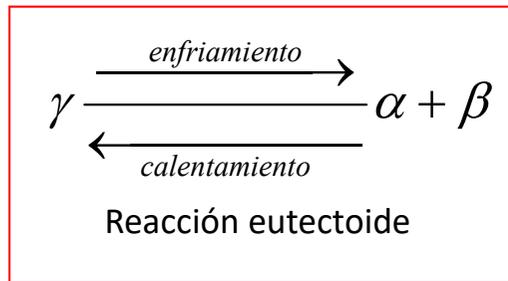
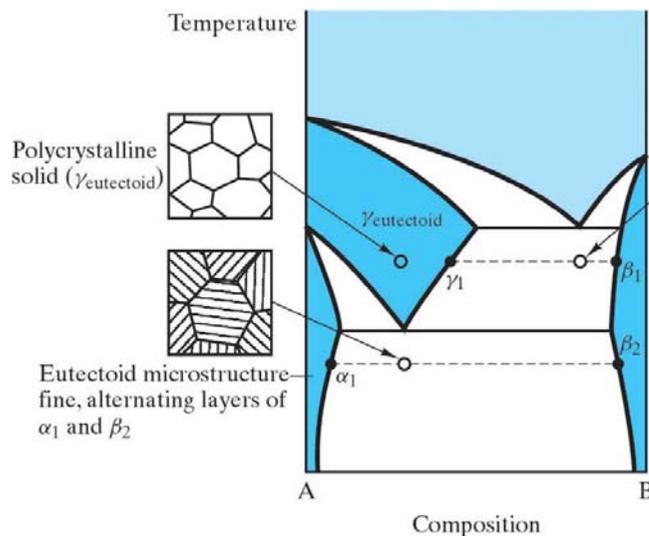


Diagrama de fases eutectoide contiene tanto una reacción eutéctica como su análoga en estado sólido, una reacción eutectoide.



Eutectic microstructure—fine-grained nodules of  $\gamma_2$  in matrix of  $\beta_1$

Microestructuras representativas del diagrama Eutectoide.

## 9.2- El diagrama de fases. Diagrama eutectoide

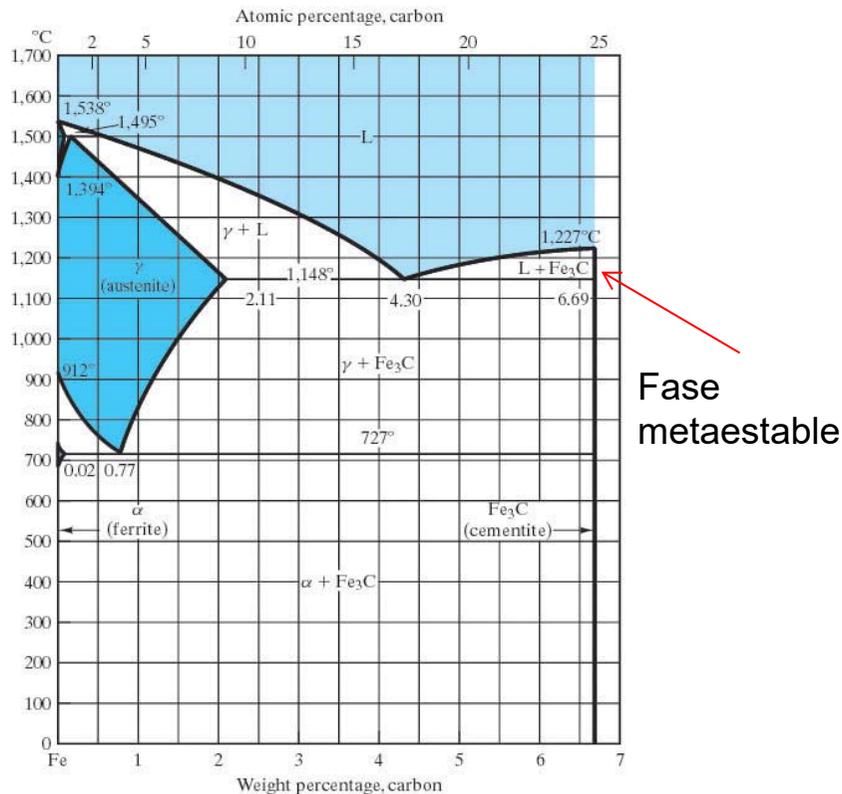


Diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C. Nótese que el eje de composición se da en porcentaje en peso de C, incluso a pesar de que el componente es el Fe<sub>3</sub>C, y no el carbono.

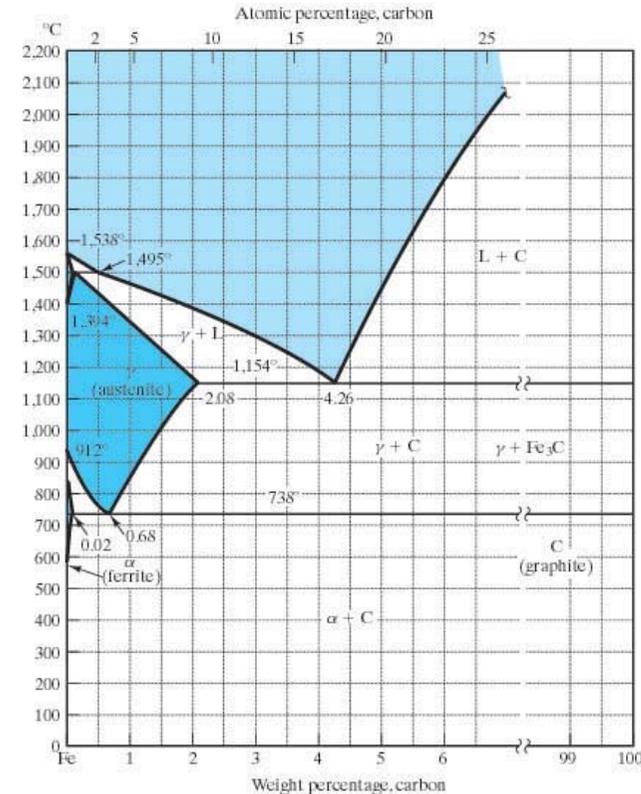


Diagrama de fases Fe-C. La parte izquierda de este diagrama es casi idéntica a la parte izquierda del diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C. En este caso, sin embargo, no existe el compuesto intermedio Fe<sub>3</sub>C

## 9.2- El diagrama de fases. Diagrama peritético

Diagrama de fases peritético que muestra una reacción peritética.

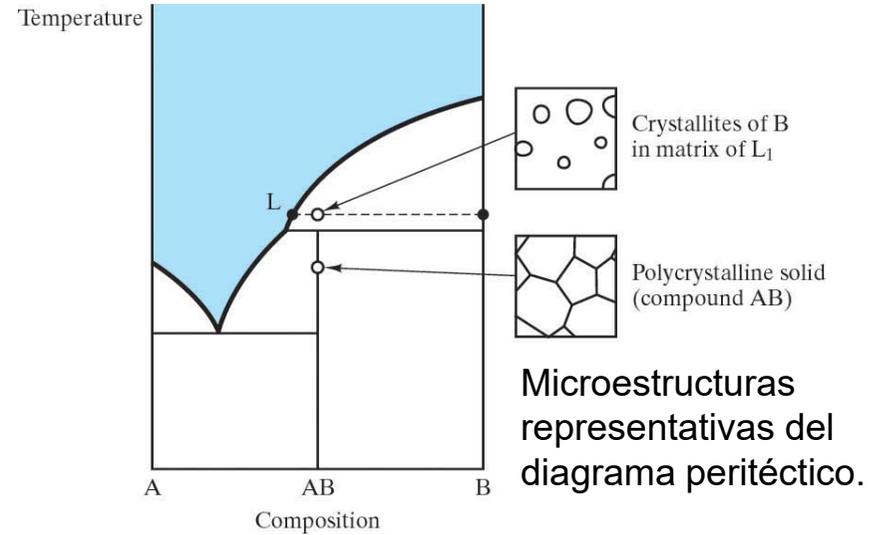
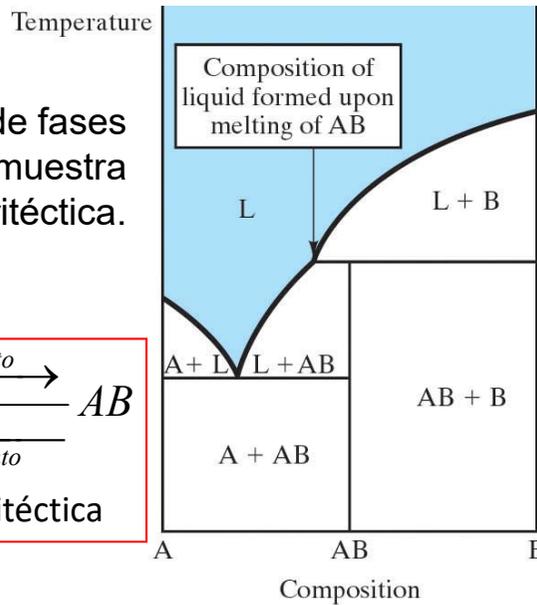
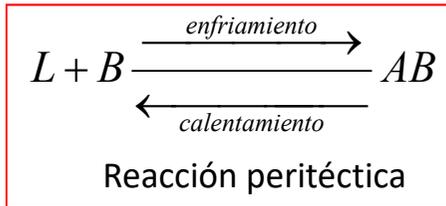
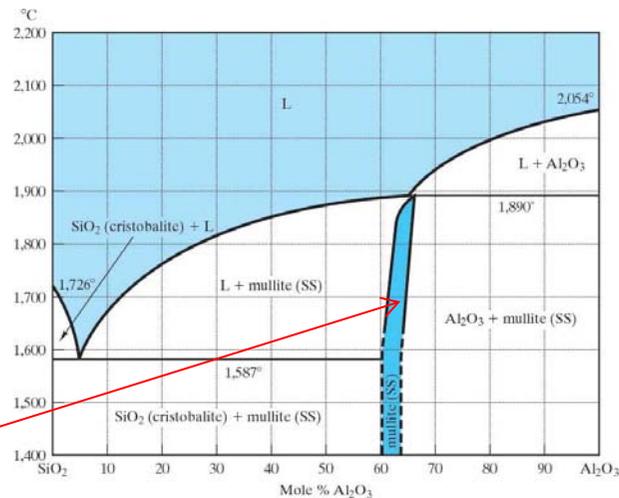


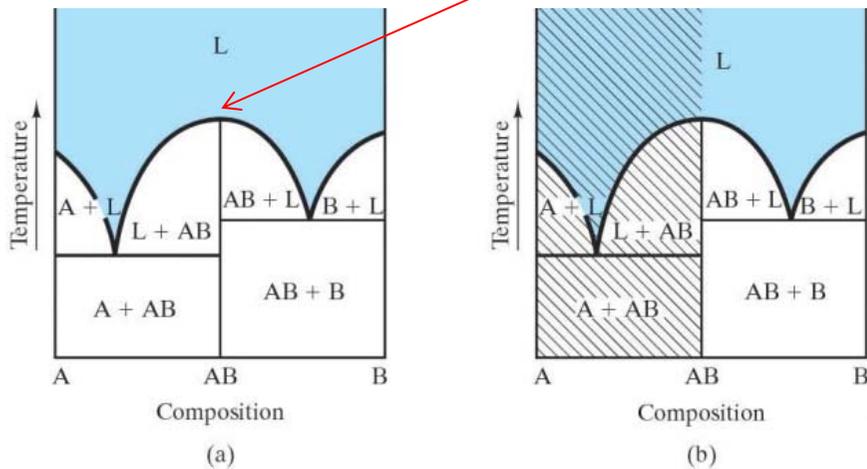
Figure 9.21

Diagrama de fases  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - $\text{SiO}_2$ . La mullita es un compuesto intermedio con estequiometría ideal  $3\text{Al}_2\text{O}_3$ - $2\text{SiO}_2$ .



## 9.2- El diagrama de fases. Diagramas binarios generales

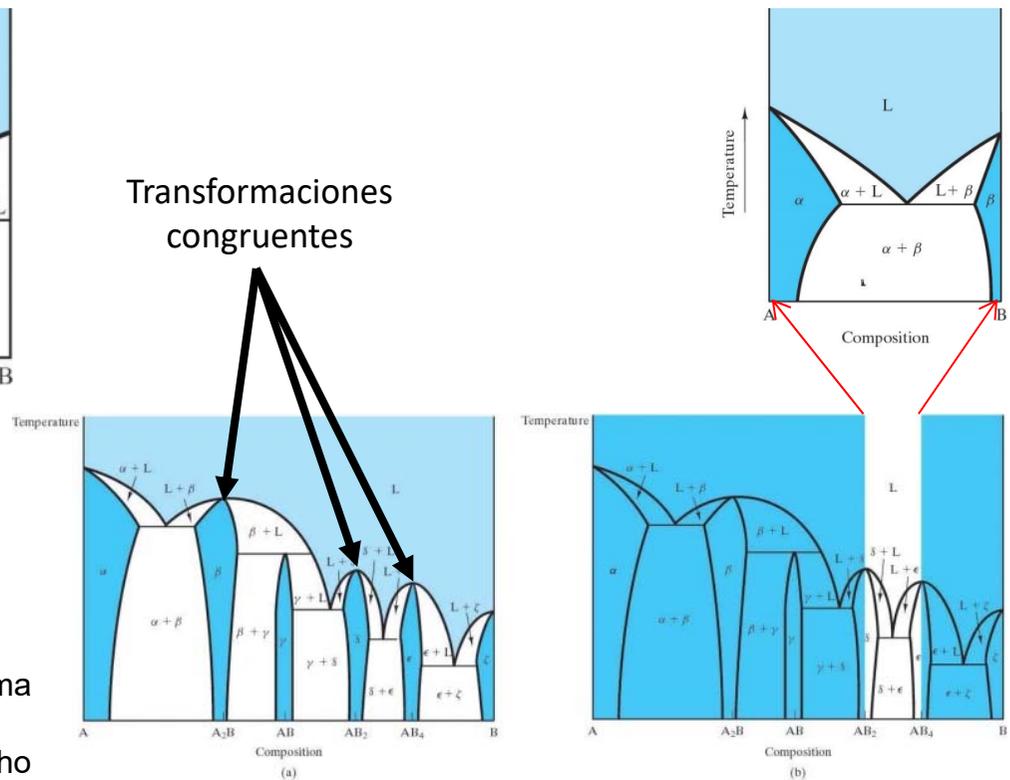
Compuesto intermedio de fusión congruente, AB.



(a) Diagrama de fases binario con un compuesto intermedio de fusión congruente, AB. Este diagrama es equivalente a dos diagramas eutécticos binarios sencillos (los sistemas A-AB y AB-B)

(b) Para el análisis de la microestructura de una composición total correspondiente al sistema AB-B, solamente es necesario considerar dicho diagrama eutéctico binario.

Transformaciones congruentes



(a) Diagrama de fases de relativa complejidad, (b) Para una composición total situada entre  $AB_2$  y  $AB_4$  sólo se necesita este sistema binario para analizar la microestructura.

## 9.2- El diagrama de fases. Diagramas binarios generales

Compuesto intermedio con solubilidad parcial

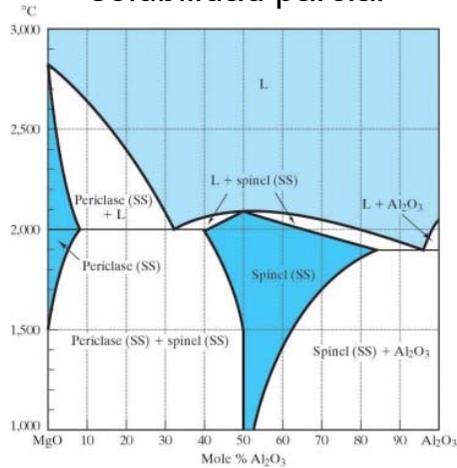


Diagrama de fases MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. La espinela es un compuesto intermedio con estequiometría ideal MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

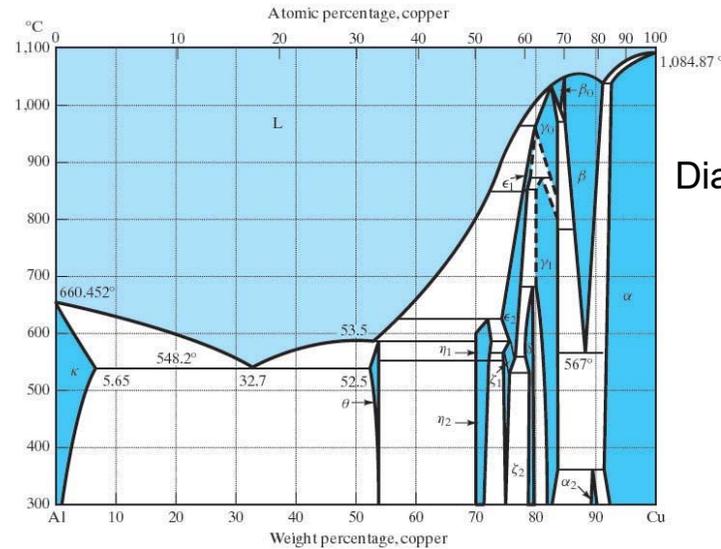


Diagrama de fases Al-Cu.

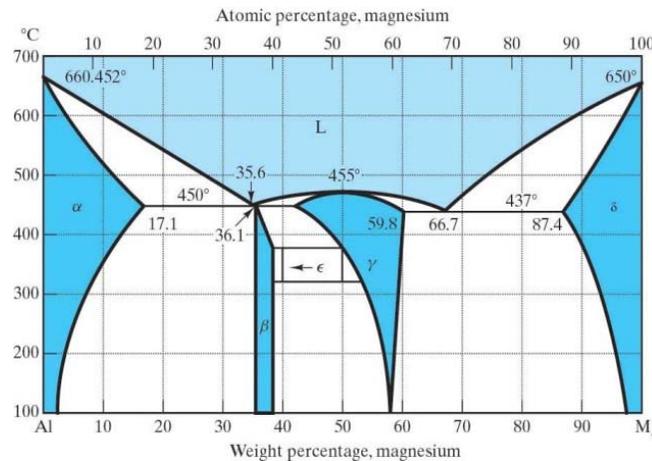


Diagrama de fases Al-Mg.

## 9.2- El diagrama de fases. Diagramas binarios generales

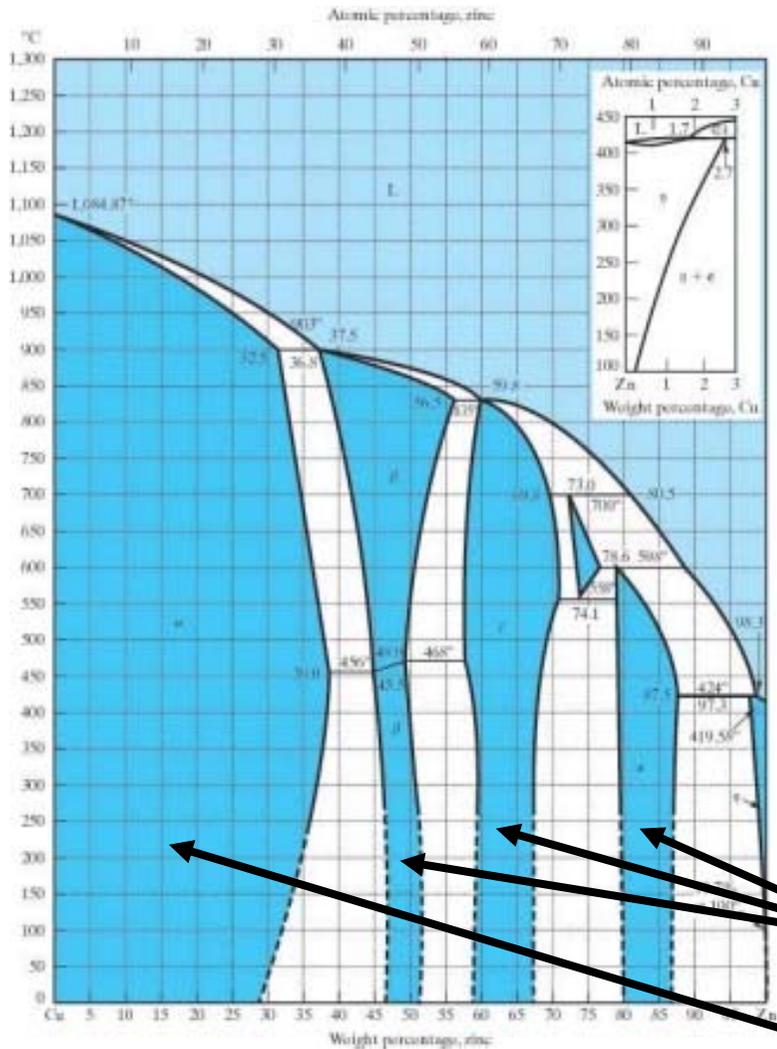


Diagrama de fases Cu-Zn.

Solución sólida intermedia

Solución sólida terminal

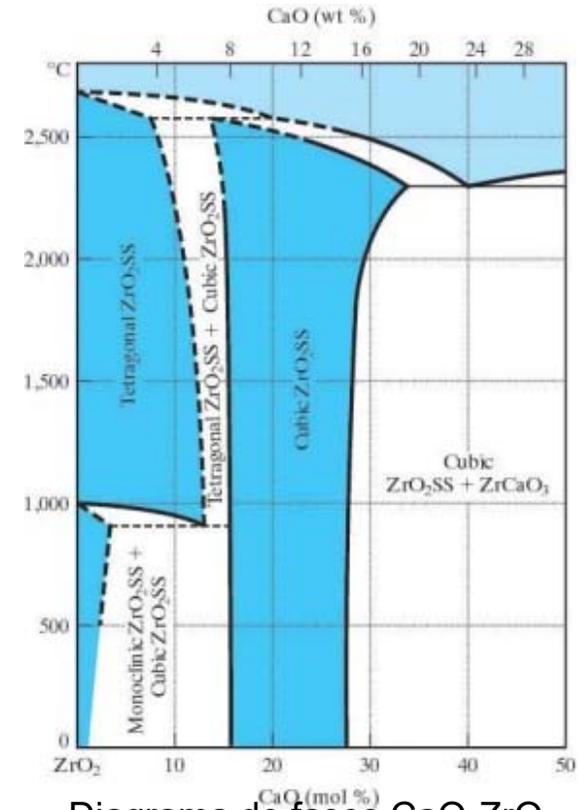
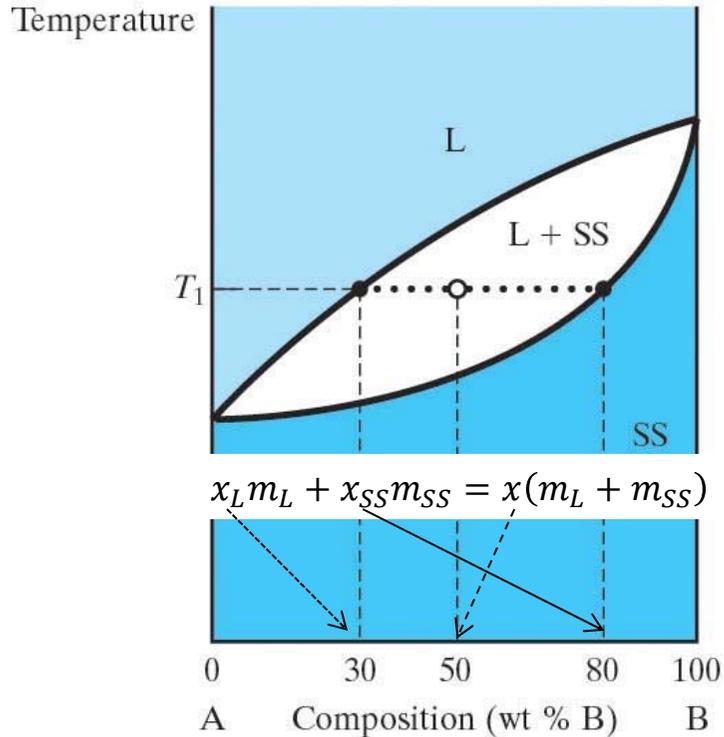


Diagrama de fases CaO-ZrO<sub>2</sub>. Las líneas discontinuas representan resultados tentativos.

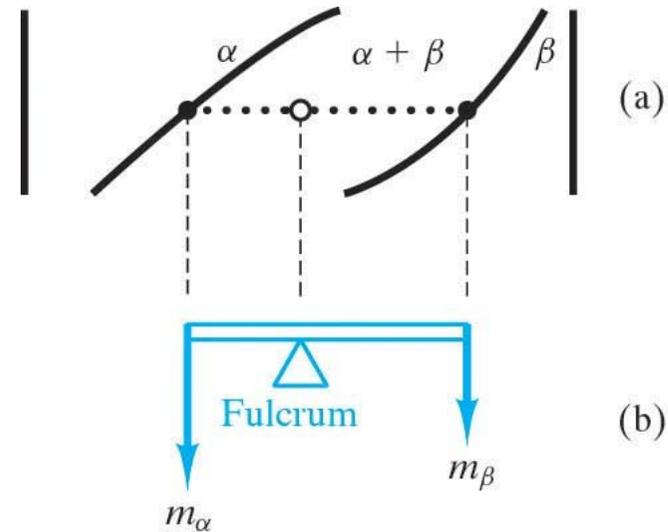
### 9.3.- La regla de la palanca



$$x_L m_L + x_{SS} m_{SS} = x(m_L + m_{SS})$$

$$\begin{aligned} m_L + m_{SS} &= m_{total} \\ 0.30 m_L + 0.80 m_{SS} &= 0.50 m_{total} \\ \rightarrow m_L &= 0.60 m_{total} \\ m_{SS} &= 0.40 m_{total} \end{aligned}$$

El tratamiento desde un punto de vista cuantitativo de la línea de temperatura constante permite calcular la cantidad de cada fase (L y SS) por medio de un **equilibrio de masas**.

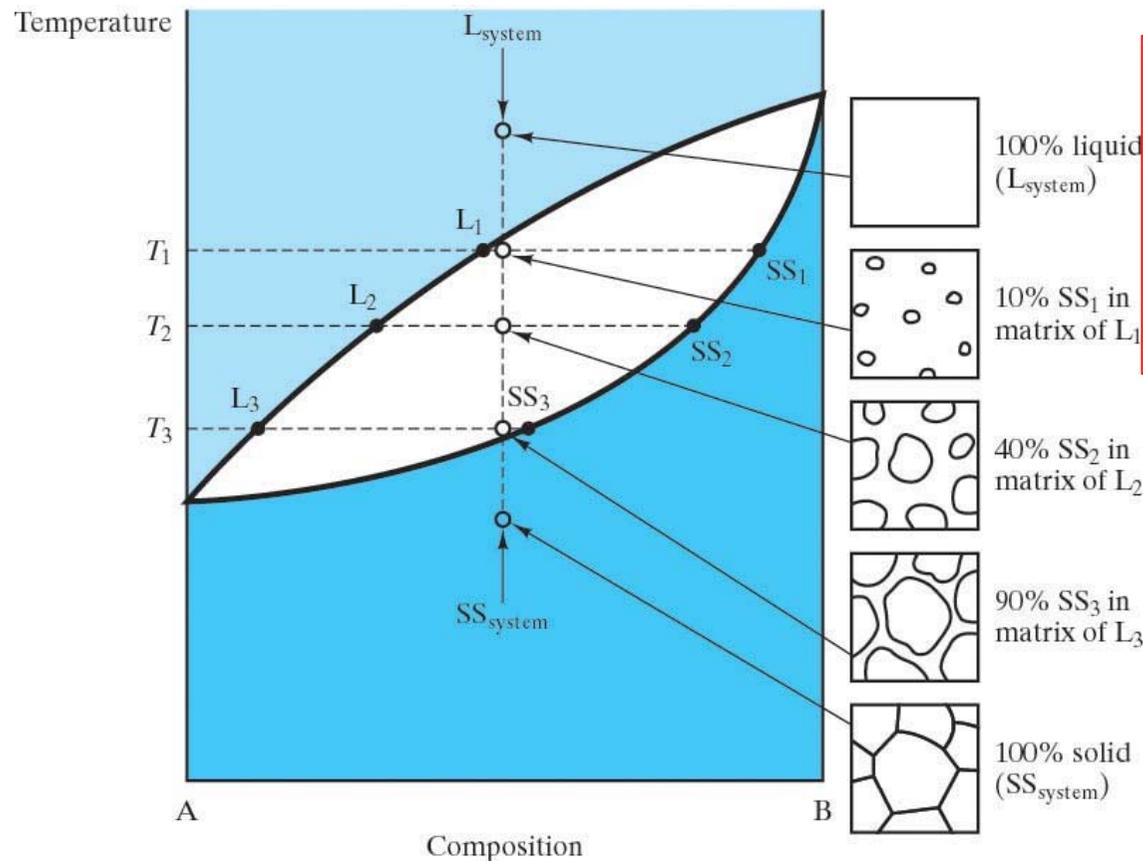


La regla de la palanca es una analogía mecánica del cálculo basado en el equilibrio de masas. El (a) tramo de línea de temperatura constante dentro de la región bifásica es análogo a (b) una palanca en equilibrio con un punto de apoyo.

Genérica:  $x_\alpha m_\alpha + x_\beta m_\beta = x(m_\alpha + m_\beta)$

$$\left. \begin{aligned} \frac{m_\alpha}{m_\alpha + m_\beta} &= \frac{x_\beta - x}{x_\beta - x_\alpha} \\ \frac{m_\beta}{m_\alpha + m_\beta} &= \frac{x - x_\alpha}{x_\beta - x_\alpha} \end{aligned} \right\} \text{Regla de la palanca}$$

## 9.4.- Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento



**Problema:** Se enfría lentamente 1 kg de una aleación con un 50% en peso de A, hasta que la composición de la fase líquida es de un 48 por ciento en peso del componente B y la de la solución sólida es de un 90 por ciento en peso del componente B. Calcúlese la cantidad de cada una de las fases.

$$m_L = \frac{90 - 50}{90 - 48} (1 \text{ kg}) = \underline{\underline{952 \text{ g}}}$$

$$m_{SS} = \frac{50 - 48}{90 - 48} (1 \text{ kg}) = \underline{\underline{48 \text{ g}}}$$

Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento de una composición 50 por ciento A-50 por ciento B en un diagrama de fases con solubilidad total en estado sólido. Para cada valor de temperatura, las cantidades de cada una de las fases de la microestructura se corresponden con un cálculo mediante la regla de la palanca.

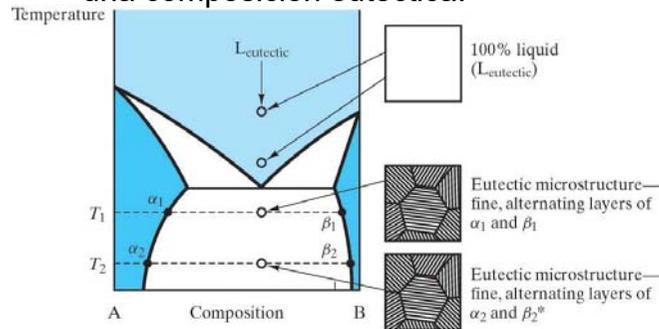
[Diagramas de fase I. UDIMA](#)

[Diagramas de fase II. UDIMA](#)

[Problemas diagramas de fase. UPV](#)

## 9.4.- Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento

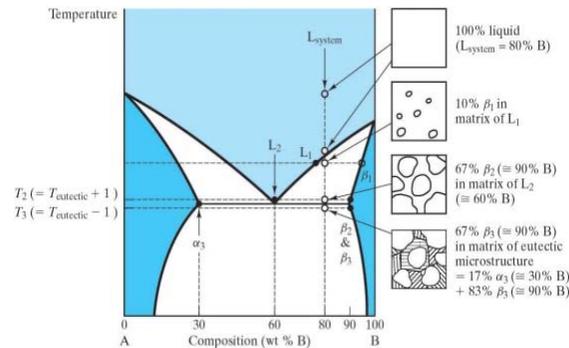
Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento de una composición eutéctica.



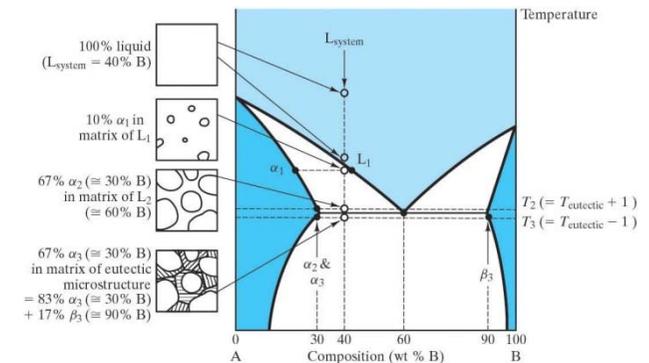
\*The only differences between this structure and the  $T_1$  microstructure are the phase compositions and the relative amounts of each phase. For example, the amount of  $b$  will be proportional to

$$\frac{x_{\text{eutectic}} - x_{\alpha}}{x_{\beta} - x_{\alpha}}$$

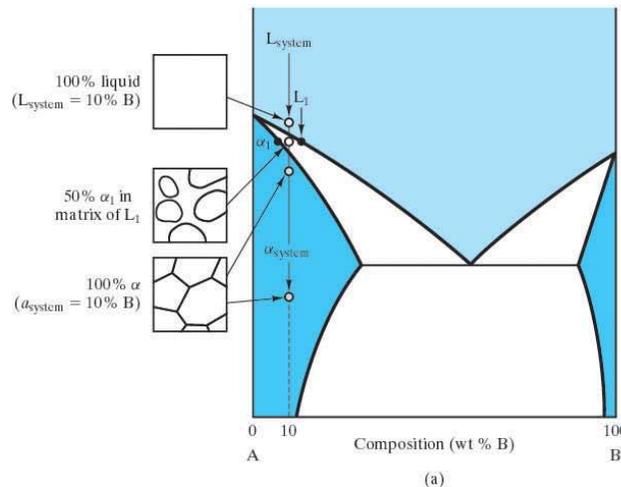
Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento de una composición hipereutéctica.



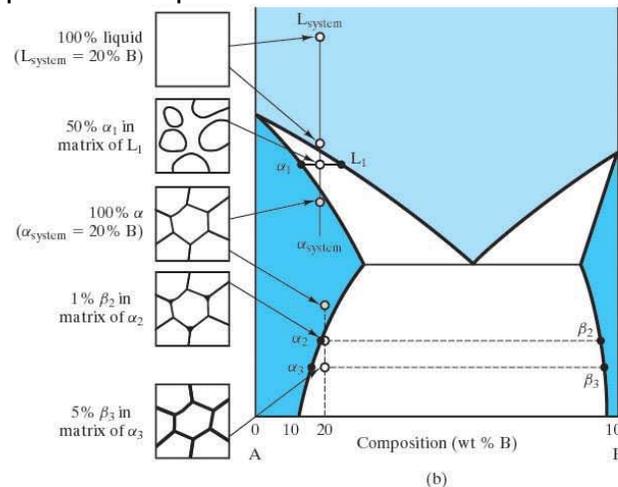
Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento de una composición hipoeutéctica.



Evolución de la microestructura de dos composiciones que evitan la reacción eutéctica.



(a)



(b)

**Problema:** En las figuras se muestran la evolución microestructural de diferentes aleaciones. Considérese 1 kg de una aleación con 50 por ciento en peso de B.

(a) Calcúlese la cantidad de fase  $\alpha$  presente a la temperatura  $T_3$ .

(b) Calcúlese qué fracción en peso de esta fase  $\alpha$  a la temperatura  $T_3$  es proeutéctica.

## 9.4.- Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento

**Problema:** En las figuras se muestran la evolución microestructural de diferentes aleaciones. Considérese 1 kg de una aleación con 50 por ciento en peso de B.

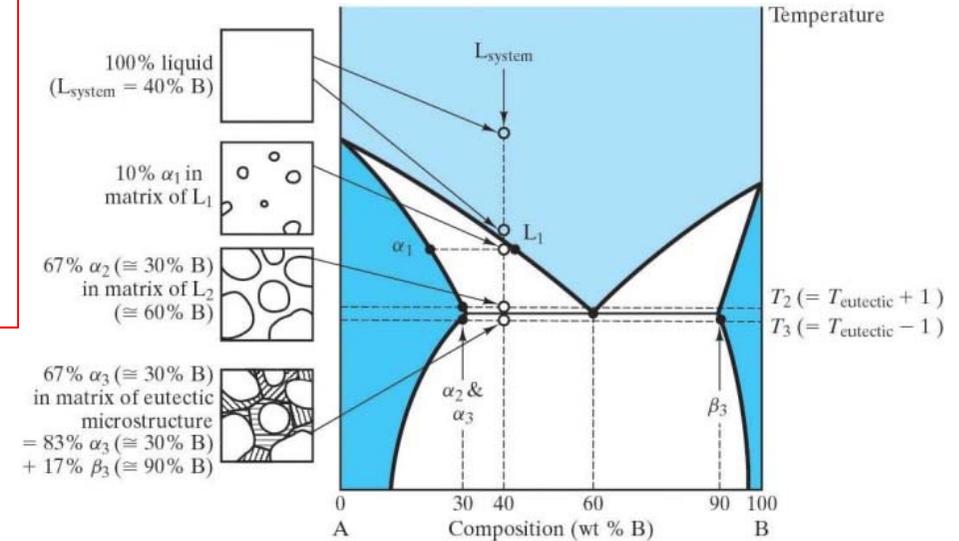
( a ) Calcúlese la cantidad de fase  $\alpha$  presente a la temperatura  $T_3$ .

( b ) Calcúlese qué fracción en peso de esta fase  $\alpha$  a la temperatura  $T_3$  es proeutéctica.

$$(a) \text{ A+ } T_3, m_\alpha = \frac{90-50}{90-30} (1\text{kg}) = 0.667\text{kg} = \underline{\underline{667\text{g}}}$$

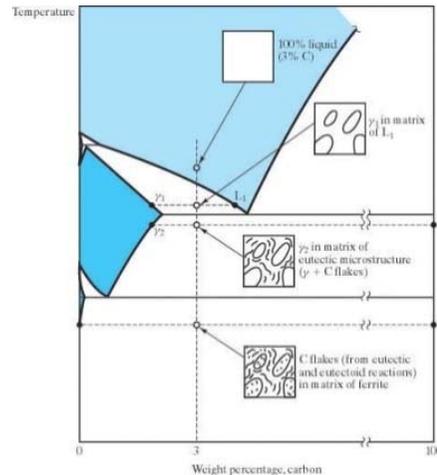
$$(b) \text{ A+ } T_2, m_\alpha = \frac{60-50}{60-30} (1\text{kg}) = 0.333\text{kg} = 333\text{g}$$

$$\text{Fracción proeutéctica } \alpha = \frac{333\text{g}}{667\text{g}} = \underline{\underline{0.50}}$$

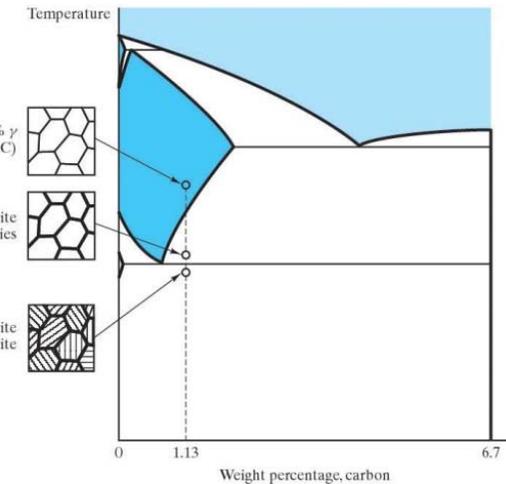
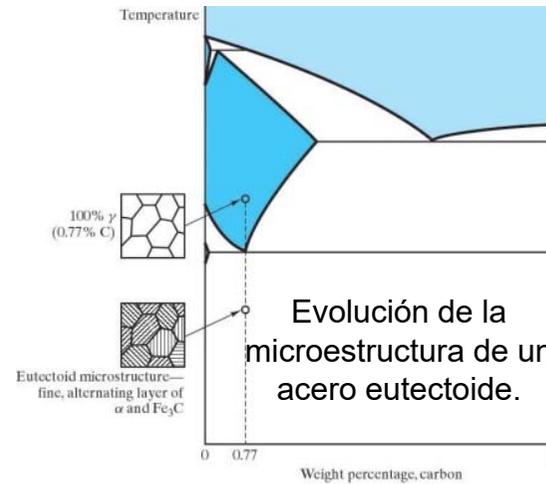


## 9.4.- Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento

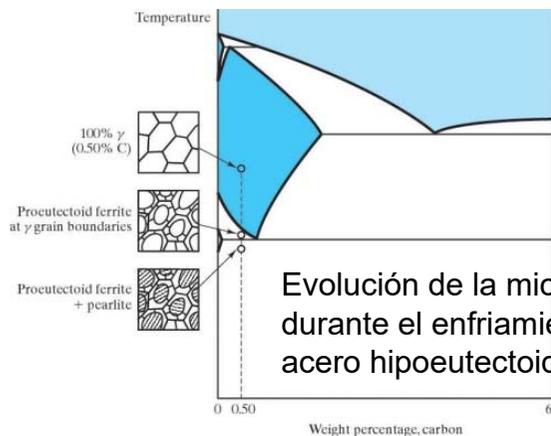
Evolución microestructural de una fundición blanca (con un 3.0 por ciento en peso de C) mostrada con la ayuda del diagrama de fases Fe-Fe<sub>3</sub>C.



Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento de un acero hipereutectoide).

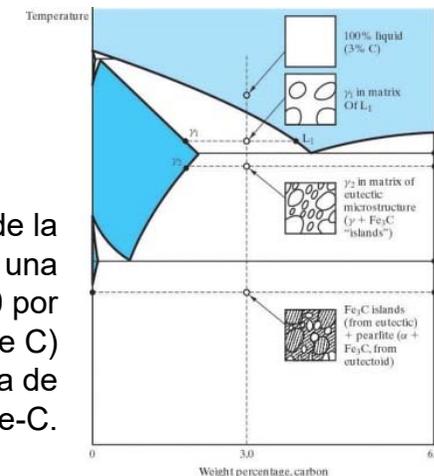


**Problema:** Calcúlese la cantidad de cementita proeutectoide en los bordes de grano de 1 kg del acero hipereutectoide con un 1.13 por ciento en peso de carbono.



Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento de un acero hipoeutectoide).

Evolución de la microestructura de una fundición gris (con un 3.0 por ciento en peso de C) mostrada en el diagrama de fases Fe-C.

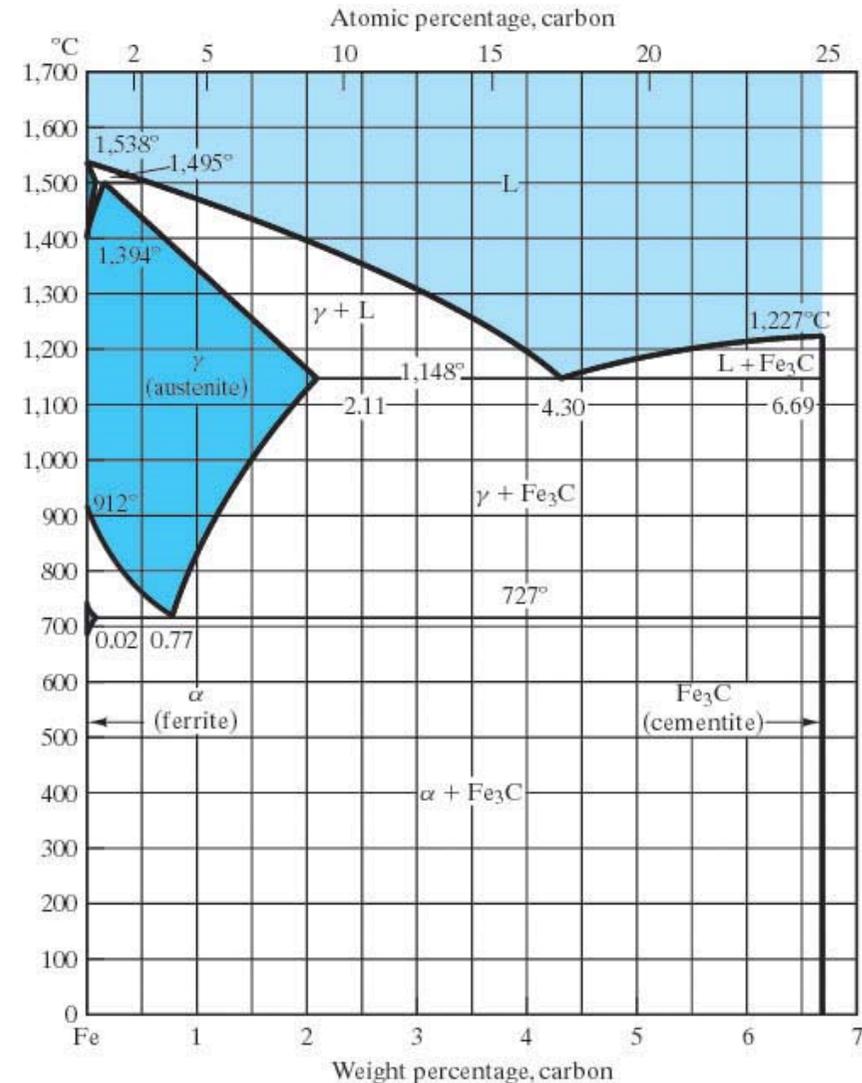


## 9.4.- Evolución de la microestructura durante el enfriamiento lento

**Problema:** Calcúlese la cantidad de cementita proeutectoide en los bordes de grano de 1 kg del acero hipereutectoide con un 1.13 por ciento en peso de carbono.

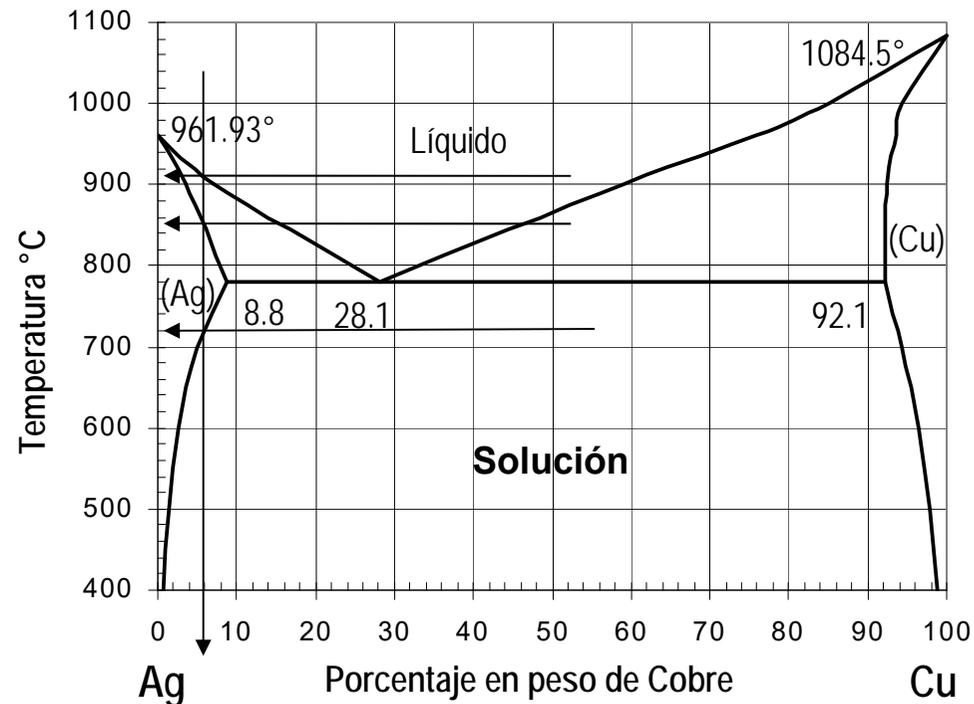
*In effect, we need to calculate the equilibrium amount of cementite at 728°C.*

$$m_{Fe_3C} = \frac{1.13 - 0.77}{6.69 - 0.77} (1 \text{ kg}) = 0.0608 \text{ kg} = \underline{\underline{60.8 \text{ g}}}$$



## 9.5.- Problemas

**Problema.** El diagrama de equilibrio de la figura corresponde al sistema Ag-Cu. Indicar utilizando el diagrama:



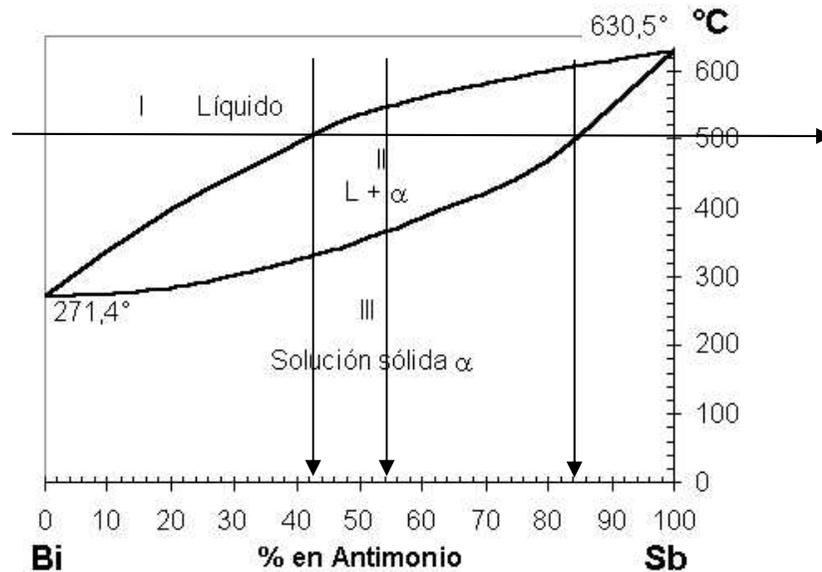
**Mas  
problemas  
en:**

**Y en:**

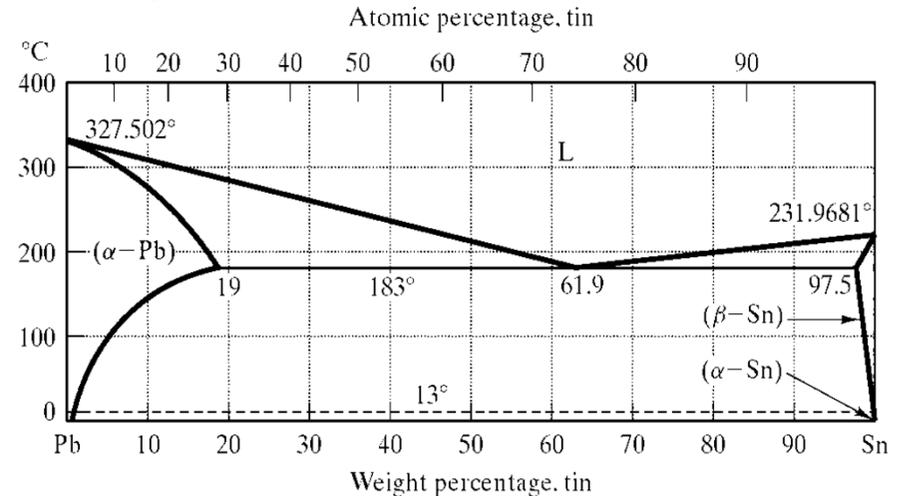
- Relación de fases en la mezcla eutéctica, a la temperatura de transformación eutéctica.
- Para una aleación con un 20% de Cu, calcular el porcentaje de fases a 400°C.
- Para esta misma aleación del 20% de Cu, calcular el porcentaje de constituyentes a 400°C.
- Transformaciones que experimenta una aleación con un 6% de Cu desde 1000°C hasta temperatura ambiente.

## 9.6.- Problemas de exámenes

**Problema.** Haciendo uso del diagrama Bi - Sb. Calcular para una aleación con 45 % de Bi situada a 500°C, la relación de fases presentes.



**Problema.** Para obtener una aleación de soldadura hemos fundido 100g de Sn junto con 60g de Pb. Suponiendo que se enfría lentamente hasta temperatura ambiente. ¿Cuántos kilogramos de constituyente eutéctico tendremos a 25°C?



## 9.6.- Problemas de exámenes

**Problema.** En las aleaciones de dos hipotéticos metales A y B, existen una fase alfa rica en A y una fase beta rica en B. A partir de las fracciones de masas de dos aleaciones, que están a la misma temperatura, determinar la composición de los límites de fase (o límite de solubilidad) de las fases alfa y beta a esta temperatura.

Composición de la aleación	Fracción fase alfa	Fracción fase beta
70% A-30% B	0,78	0,22
35% A-65% B	0,36	0,64

**Problema.** Un análisis metalográfico de los constituyentes de un acero, desvelaron que la cantidad de Fe- $\alpha$  proeutectoide presente era del 75%.

¿Cuál es el porcentaje de carbono de este acero?

