

Interpretación de un diagrama eutéctico. Problema resuelto.

Considere el diagrama de fases al equilibrio del sistema binario Pb-Sn, y aleaciones de las siguientes composiciones.

- a) Pb-0%p. Sn (plomo puro);
- b) Pb-100%p. Sn (estaño puro).
- c) Pb-61,9%p. Sn (composición eutéctica)
- d) Pb-10%p. Sn
- e) Pb-40%p. Sn; (composición hipoeutéctica)
- f) Pb-50%p. Sn; (composición hipoeutéctica)
- g) Pb-85%p. Sn. (composición hipereutéctica)

En dicho diagrama el Pb puro y la solución sólida terminal basada en él se llaman α , en tanto que el Sn puro y la solución sólida terminal basada en él se llaman β .

Suponga que a las aleaciones especificadas se les extrae calor, bajo condiciones de equilibrio, desde 400°C hasta la temperatura ambiente. Se pide representar:

- i) Curvas de composición de la o las fases presentes en función de la temperatura. T.
 - ii) Curvas de fracción en peso de la o las fases presentes en función de la temperatura. T.
- Para ambos tipos de curvas, al igual que en el diagrama de equilibrio Pb-Sn, represente la temperatura en la vertical.

RESPUESTA

(Ver soluciones gráficas al final del texto)

Caso aleación Pb-0%p. Sn (Pb puro).

Curva tipo i):

- para $T > T_S^{Pb}$: $W_L(T) = W_0 = 0\% \text{p. Sn}$ (Pb puro).
- para $T = T_S^{Pb}$, la composición de la o las fases presentes (L y/o α) es 0%p. Sn.
- para $T < T_S^{Pb}$: $W_\alpha(T) = W_0 = 0\% \text{p. Sn}$.

Curva tipo ii):

- para $T > T_S^{Pb}$: $X_L(T) = 1$.
- para $T = T_S^{Pb}$, donde puede existir L y/o α : sólo se sabe $X_L(T) + X_\alpha(T) = 1$. Al extraer calor se produce la solidificación.
- para $T < T_S^{Pb}$: $X_\alpha(T) = 1$,

Caso aleación Pb-100%p. Sn (Sn puro).

El análisis es similar al caso de Pb puro, considerando ahora una fase denominada β .

Caso aleación Pb-10%p. Sn.

Esta es una aleación del tipo $W_0 < 19,2\% \text{p. Sn}$. Ella no experimenta la transformación eutéctica. Al enfriar se pasa por campos monofásico L, bifásico L+ α y monofásico α .

Curva tipo i):

-para $T \geq T_{\text{solidus}}(W_0)$, o rango monofásico L: $W_L = W_0 = 10\% \text{p. Sn}$.

-para T en el rango bifásico L+ α : $W_L = \underline{W_L}(T)$ y $W_\alpha = \underline{W_\alpha}(T)$, donde el subrayado indica la condición de saturación.

- para T en el rango monofásico α : $W_\alpha = W_0 = 10\% \text{p. Sn}$.

Curva tipo ii):

-para T en el rango monofásico L: $X_L(T) = 1$ (en peso)

- para T en el rango bifásico L+ α , según la regla de la palanca: $X_L(T) = [W_0 - \underline{W_\alpha}(T)] / [\underline{W_L}(T) - \underline{W_\alpha}(T)]$ donde el subrayado indica la condición de saturación. Nótese que la función X_L no es estrictamente lineal con respecto a T. También se cumple: $X_\alpha(T) = [\underline{W_L}(T) - W_0] / [\underline{W_L}(T) - \underline{W_\alpha}(T)] = [1 - X_L(T)]$ (en peso).

- para T en el rango monofásico α : $X_\alpha(T) = 1$ (en peso).

Caso aleación Pb-61,9%p. Sn (composición eutéctica).

Esta es una aleación de composición exactamente eutéctica. Al pasar por la temperatura eutéctica, extrayendo calor, bajo condiciones de equilibrio, se producirá la transformación de dicho nombre, en forma isotérmica. No aparecerá ninguna fase proeutéctica (o primaria).

Curva tipo i):

- para $T > T_E = 183^\circ\text{C}$, campo monofásico L: $W_L(T) = W_0 = 61,9\% \text{p. Sn}$.

-para $T = T_E = 183^\circ\text{C}$, ocurrirá la transformación isotérmica desde el líquido eutéctico ($W_L = 61,9\% \text{p. Sn}$) a las fases sólidas α y β , con $W_\alpha(T) = 19,2\% \text{p. Sn}$ y $W_\beta = 97,5\% \text{p. Sn}$, respectivamente. Esto ocurre en función del tiempo e isotérmicamente, al extrae calor.

- para $T < T_E = 183^\circ\text{C}$, campo bifásico $\alpha + \beta$, las composiciones de las dos fases presentes se leen a los costados del campo. Así: $W_\alpha(T) = \underline{W_\alpha}(T)$ y $W_\beta(T) = \underline{W_\beta}(T)$, donde el subrayado indica las composiciones de saturación de las fases pertinentes.

Curva tipo ii):

- para T en el rango monofásico L: $W_L(T) = 1$ (en peso)

--para $T = T_E = 183^\circ\text{C}$, ocurrirá la transformación isotérmica donde el líquido eutéctico L ($W_L = W_E$) se transforma en las fases sólidas α y β . Sólo se sabe que cumple: $X_L + X_\alpha + X_\beta = 1$. Al extraer calor, X_L disminuye y $X_\alpha + X_\beta$ aumenta según $(X_\alpha + X_\beta) = (1 - X_L)$.

- para T en el rango bifásico $\alpha+\beta$, se cumple, según la regla de la palanca: $X_\alpha(T) = \frac{[W_\beta(T) - W_0]}{[W_\beta(T) - W_\alpha(T)]}$, donde el subrayado indica la condición de saturación. Nótese que la función W_α no es estrictamente lineal con respecto a T. También se cumple: $W_\beta(T) = \frac{[W_0 - W_\alpha(T)]}{[W_\beta(T) - W_\alpha(T)]} = [1 - W_\alpha(T)]$.

Caso aleaciones Pb-40,0%p.Sn y Pb-50,0%p.Sn (compos. hipoeutécticas).

Se trata de dos aleaciones hipoeutécticas, pues para ambas se cumple $19,2\% \text{p.Sn} < W_0 < 61,9\% \text{p.Sn}$. El análisis de estas aleaciones es similar. Se analizará primero el caso de la aleación $W_0 = 40\% \text{p.Sn}$, y luego se comentará la diferencia entre los resultados de ambas aleaciones, $W_0 = 40\% \text{p.Sn}$ y $W_0 = 50\% \text{p.Sn}$.

Curva tipo i) de la aleación $W_0 = 40\% \text{p.Sn}$:

-para $T \geq T_{\text{solidus}}(W_0)$, o rango monofásico L: $W_L(T) = W_0 = 40,0\% \text{p.Sn}$.

-para T dentro del campo bifásico $L+\alpha$, se tendrá: $W_L(T) = \underline{W_L}(T)$ y $W_\alpha(T) = \underline{W_\alpha}(T)$. La lectura se hace a los costados del campo. La fase que aquí aparece es la fase α primaria o proeutéctica (sólo un nombre).

-para $T = T_E + \epsilon$: $W_\alpha(T) = 19,2\% \text{p.Sn}$ y $W_L = W_E = 61,9\% \text{p.Sn}$. Nótese que éste es ahora un líquido de composición eutéctica ($W_L = W_E$), el cual podrá transformarse eutécticamente a la temperatura eutéctica T_E . Por otra parte, la fase primaria complementaria no será afectada por la transformación eutéctica a T_E .

- para $T = T_E = 183^\circ\text{C}$, ocurrirá la transformación eutéctica por extracción de calor: $L \rightarrow \alpha + \beta$. Las eventuales fases presentes tendrán las siguientes composiciones: $W_L = W_E = 61,9\% \text{p.Sn}$, $W_\alpha = \underline{W_\alpha}(T_E) = 19,1\% \text{p.Sn}$ y $W_\beta = \underline{W_\beta}(T_E) = 97,5\% \text{p.Sn}$.

-para $T = T_E - \epsilon$, ya en el campo bifásico $\alpha + \beta$: $W_\alpha = 19,2\% \text{p.Sn}$ y $W_\beta = 97,5\% \text{p.Sn}$.

En general, para $T < T_E$, campo bifásico $\alpha + \beta$, las composiciones de las dos fases presentes se leen a los costados del campo. Así: $W_\alpha(T) = \underline{W_\alpha}(T)$ y $W_\beta(T) = \underline{W_\beta}(T)$, donde el subrayado indica las composiciones de saturación de las fases pertinentes.

Curva tipo ii) de la aleación $W_0 = 40\% \text{p.Sn}$:

-para T en el rango monofásico L: $X_L(T) = 1$ (en peso).

-para T dentro del campo bifásico $L + \alpha$, según la regla de la palanca: $X_\alpha(T) = \frac{[W_L(T) - W_0]}{[W_L(T) - W_\alpha(T)]}$, donde el subrayado indica la condición de saturación. Nótese que la función X_α no es estrictamente lineal con respecto de T. También se cumple: $X_L(T) = \frac{[W_0 - W_\alpha(T)]}{[W_L(T) - W_\alpha(T)]} = [1 - W_\alpha(T)]$. Ese $W_\alpha(T)$ es todo de α primario.

-para $T = T_E = 183^\circ\text{C}$, al extraer calor, ocurrirá la transformación isotérmica eutéctica. Sólo se sabe que cumple: $X_L + X_\alpha + X_\beta = 1$. El α primario no se transforma y está incluido dentro del X_α , junto con la fase α resultado de la solidificación del líquido eutéctico a $T = T_E$.

- para T en el rango bifásico $\alpha + \beta$, según la regla de la palanca: $X_\alpha(T) = \frac{[W_\beta(T) - W_0]}{[W_\beta(T) - W_\alpha(T)]}$, donde el subrayado indica la condición de saturación. Nótese que la función W_α no es estrictamente lineal con respecto de T. También se cumple: $W_\beta(T) = \frac{[W_0 - W_\alpha(T)]}{[W_\beta(T) - W_\alpha(T)]} = [1 - W_\alpha(T)]$.

Diferencias entre las aleaciones $W_0 = 40\% \text{p.Sn}$ y $W_0 = 50\% \text{p.Sn}$.

La temperatura límite entre el campo L y el campo $\alpha + L$, es diferente; ello se debe a que la temperatura de liquidus depende de la composición de la aleación. Las composiciones de las fases en los campos monofásicos serán diferentes. Las fracciones de las fases en los campos bifásicos serán diferentes.

Caso aleaciones Pb-85,0%p.Sn (composiciones hipereutéctica).

El análisis de esta aleación hipereutéctica (Pb-85,0%p.Sn) es similar a aquel de las aleaciones hipoeutécticas ya analizadas ($W_0 = 40\% \text{p.Sn}$ y $W_0 = 50\% \text{p.Sn}$). Sólo hay que considerar que, extrayendo calor, al pasar por la temperatura de liquidus respectiva, en el caso de una aleación hipereutéctica, se entra a un campo bifásico $L + \beta$, donde precipitará una fase β primaria o proeutéctica.

Transformación a $T = T_E$, aleac. hipoeutéctica.

Revisemos las transformaciones que ocurren en una aleación hipoeutéctica, al pasar, extrayendo calor, bajo condiciones de equilibrio, desde $T = T_E + \epsilon$ hasta $T = T_E - \epsilon$. Consideremos una aleación de composición W_0 .

Debe tenerse presente que, desde la perspectiva del equilibrio, hay una sola fase α (en el sentido de una estructura cristalina y una composición). Sin embargo, para nuestro análisis, es conveniente distinguir entre la fase α que aparece en el rango $\alpha + L$, a la que llamamos α primario (α_p), y aquella que aparece isotérmicamente a $T = T_E$, por descomposición del líquido eutéctico. También veremos que, observando con un microscopio óptico podríamos hacer la distinción entre las dos fases, en términos de su origen, lo cual es muy útil.

-A $T = T_E + \epsilon$:

se tienen dos fases presentes: una es α primario, α_p ($W_\alpha = 19,2\% \text{p.Sn}$), y la otra es L ($W_L = W_E = 61,9\% \text{p.Sn}$) de composición eutéctica.

-A $T=T_E + \varepsilon$ se tiene, extrayendo calor:

Según corresponde a una transformación eutéctica y al diagrama Pb-Sn:

$L(W_L=W_E=61,9\%p.Sn) \rightarrow \alpha(W_\alpha=19,2\%p.Sn) + \beta(W_\beta=97,5\%p.Sn)$.

Así, por la transformación eutéctica, habrá aparecido isotérmicamente α y β provenientes del líquido eutéctico.

Por otra parte, α_p NO se transforma:

$\alpha_p(W_\alpha=19,2\%p.Sn) \rightarrow \alpha_p(W_\alpha=19,2\%p.Sn)$.

-A $T=T_E - \varepsilon$:

Sólo habrá

$\alpha(W_\alpha=19,2\%p.Sn) + \beta(W_\beta=97,5\%p.Sn)$.

Ese α estará constituido por α_p y por α proveniente de la descomposición eutéctica. Ese β provendrá totalmente de la descomposición eutéctica.

Si aplicamos la regla de la palanca a $T_E - \varepsilon$, obtendremos X_α y X_β . Cada uno de estos valores corresponde al total de la respectiva fase a esa temperatura. El diagrama no distingue entre el α que es primario y el que no lo es.

Si nos interesase calcular la fracción en peso de α_p existente a $T=T_E - \varepsilon$ en una aleación hipoeutéctica, ¿cómo lo haríamos?.

Sabemos que el α_p no se transformó a $T=T_E$, por lo tanto:

$$X_{\alpha p}(T_E - \varepsilon) = X_{\alpha p}(T_E + \varepsilon)$$

Pero también:

$$X_{\alpha p}(T_E + \varepsilon) = X_\alpha(T_E + \varepsilon)$$

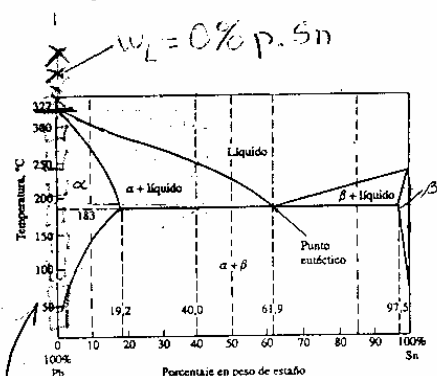
Finalmente, $X_\alpha(T_E + \varepsilon) = \frac{[W_L(T) - W_0]}{[W_L(T) - W_\alpha(T)]}$, cálculo que se hace por la regla de la palanca en el campo $\alpha+L$.

El correspondiente análisis de una aleación hipereutéctica es similar al recién visto para una aleación hipoeutéctica. Sólo hay que considerar que al extraer calor se atraviesa un campo $L+\beta$ y que, consecuentemente, aparece una fase β primaria, β_p , en lugar de una α primaria, α_p .

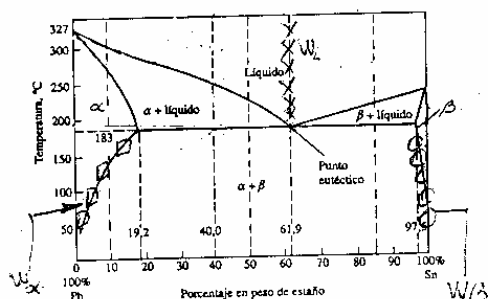
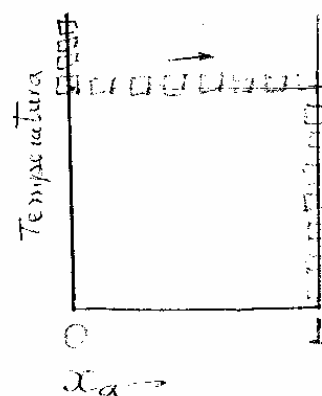
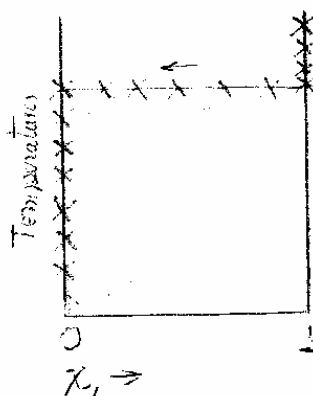
Solución gráfica de problemas sistema eutéctico Pb-Sn.

Para aleaciones de distinta composición, que son enfriadas bajo condiciones de equilibrio, se presentan:

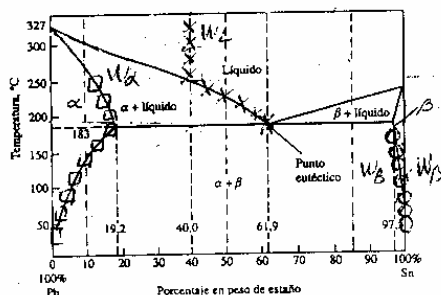
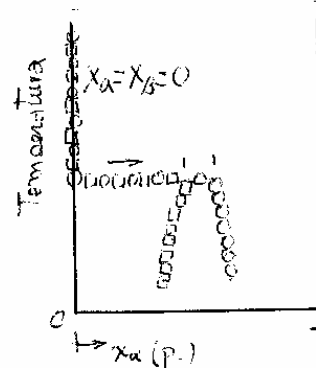
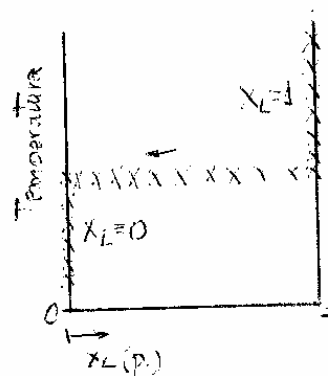
- gráficos composición de la o las fases presentes en función de la temperatura
- gráficos de fracción de la o las fases presentes, en función de la temperatura.



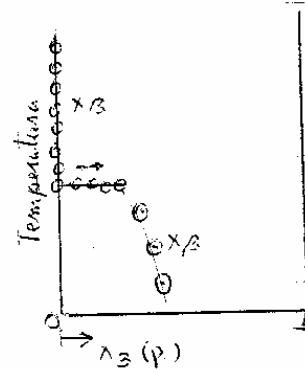
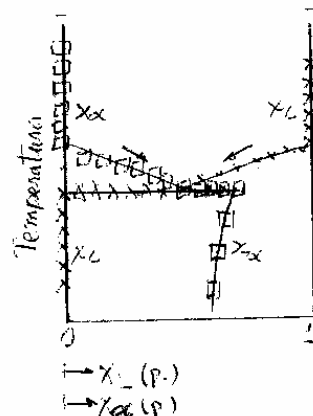
$w_L = 0\% \text{ p. Sn}$
 $w_\alpha = 0\% \text{ p. Sn}$
 $w_\beta = 0\% \text{ p. Sn}$

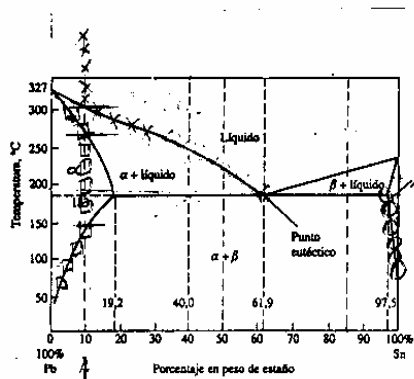


$w_L = w_E = 61.9\% \text{ p. Sn}$

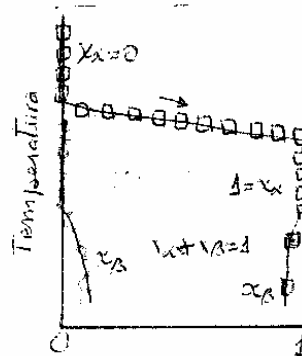
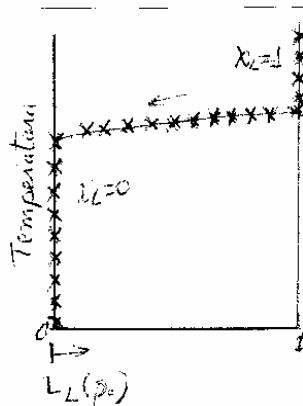


$w_L = 40\% \text{ p. Sn}$

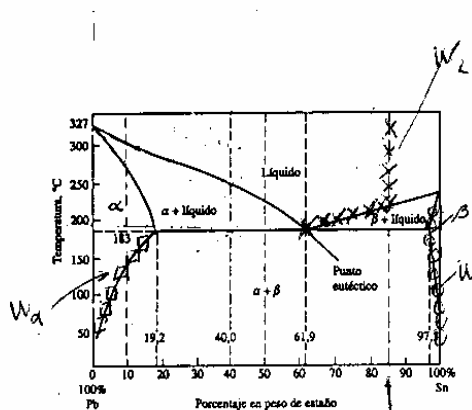




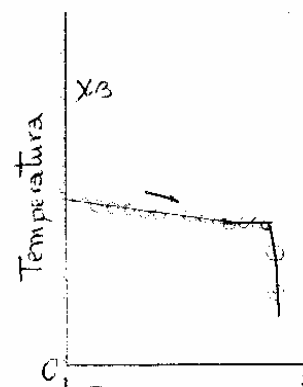
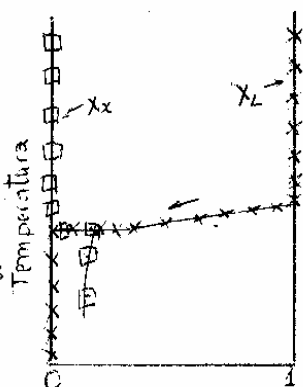
$W_0 = 10\% \text{ p. Sn}$



$\rightarrow X_B(p.)$
 $\rightarrow X_L(p.)$



$W_0 = 85\% \text{ p. Sn}$



¿Qué significa $X_B = 0,35$?

X_B : fracción en peso de fase .

Significa que un 35% en peso del sistema está bajo la forma de fase β . Es decir, que de cada 100 g de aleación, 30 g corresponden a fase

¿Qué significa $W_\beta = \text{Pb}-24\% \text{ p. Sn}$

Significa que en una aleación Pb-Sn, la fase β tiene un composición donde de cada 100 g de fase β , 24 g corresponden a Sn, resto Pb.