

ALEACIONES. DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO

DIAGRAMAS ISOMÓRFICOS BINARIOS

Para estudiar este tipo de diagrama vamos a basarnos en el diagrama Cu – Ni. Es el sistema más clásico por su fácil comprensión e interpretación. **En ordenadas se representa la temperatura, y en abscisas la concentración en peso.**

La composición varía desde el 0% en peso de Ni (100% de Cu) en el extremo izquierdo, hasta el 100% de Ni (0% de Cu) en el extremo derecho.

En el diagrama podemos observar 3 campos delimitados por 2 líneas: un **campo sólido α** , un **campo líquido L** y un **campo bifásico $\alpha+L$** .

Cada campo se caracteriza por las fases existentes en el tramo de temperaturas y concentraciones delimitado por las líneas limitadoras de fases.

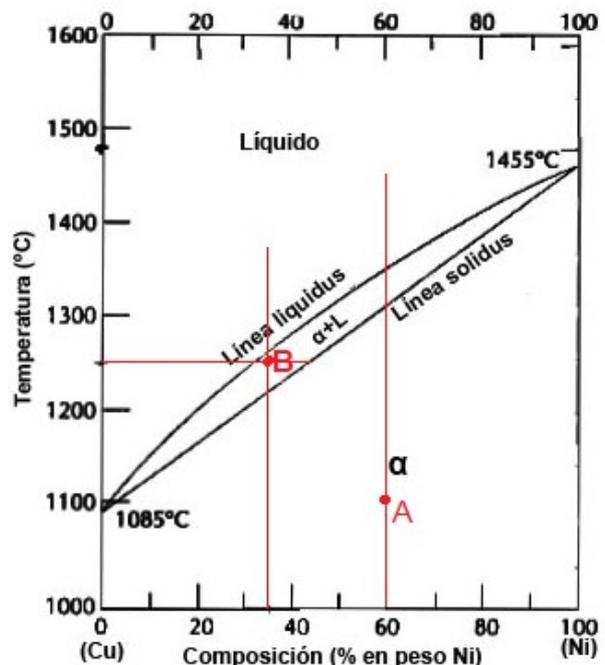
El líquido L es una disolución homogénea compuesta por Cu y Ni. La fase α es una disolución sólida por sustitución, de átomos de Cu y de Ni. A temperaturas inferiores a 1080°C el Cu y el Ni son mutuamente solubles en estado sólido a cualquier composición, ya que Cu y Ni tienen la misma estructura cristalina (FCC), radios atómicos y electronegatividades casi idénticas, así como valencias muy similares. Este sistema resultante se denomina **isomorfo**, porque **sus componentes son totalmente solubles en estado sólido y líquido.**

Las **líneas de solidus y liquidus** interseccionan a derecha e izquierda con la ordenada temperatura; los puntos de intersección coinciden con los puntos de fusión de los componentes puros. En este caso son 1085°C para el Cu y 1455°C para el Ni.

Para cualquier composición diferente de los componentes puros, tiene lugar el fenómeno de la fusión en un tramo de temperaturas comprendido entre las líneas de solidus y liquidus. En este margen permanecen en equilibrio las fases sólida y líquida. Por ejemplo, calentando una aleación de 50% de peso en Ni y 50% de Cu, esta comienza a fundir a 1280°C, y la proporción de líquido aumenta al incrementar la temperatura hasta llegar a los 1320°C, en que la aleación funde totalmente.

INTERPRETACIÓN GENERAL DEL DIAGRAMA DE FASES

Conociendo la concentración y la temperatura de equilibrio, los sistemas binarios nos suministran la información siguiente: número de fases presentes en el equilibrio composición de cada fase y la fracción o porcentaje de cada fase. Nos vamos a referir siempre al diagrama Cu – Ni.



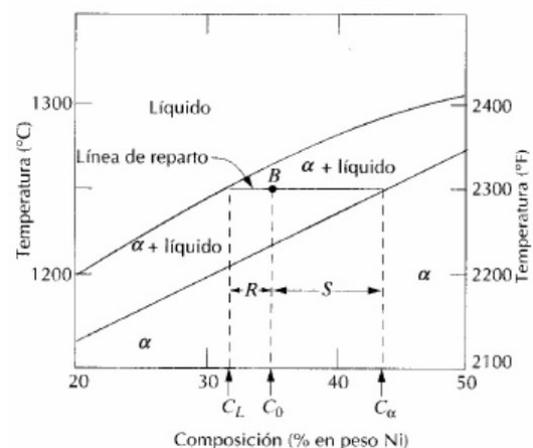
1.- Número de fase presentes: El punto A representa una aleación de composición 60% en peso de Ni y 40% en peso de Cu, a 1100°C; se encuentra en la región monofásica α , por lo que únicamente estará presente la fase α . El punto B representa una aleación de 35% en peso de Ni y 65% en peso de Cu a 1250°C, y se encuentra en la región bifásica $\alpha+L$, por tanto, estarán presentes la fase α en equilibrio con la fase líquida L.

2.- Determinación de la composición de las fases: Primero localizaremos el punto temperatura – concentración en el diagrama de fases. En un sistema monofásico, el procedimiento es sencillo: la composición de la fase coincide con la composición total de la aleación. Ejemplo: consideramos el punto A, aleación 60% en peso de Ni y 40% en peso de Cu a 1100°C. En estas condiciones de composición y de temperatura sólo existe una fase.

Para una aleación en condiciones de composición y temperatura localizada en una región bifásica, la solución es más complicada. En estas regiones podemos trazar imaginariamente líneas horizontales a una temperatura determinada, que denominaremos **rectas de reparto o isotermas**. Las concentraciones en equilibrio de las dos fases presentes se calculan de la siguiente manera:

- 1.- Se traza una recta a través de la región bifásica a la temperatura de la aleación.
- 2.- Se anotan las intersecciones de la recta de reparto con los dos límites de fase de los extremos.
- 3.- A partir de las intersecciones, se trazan perpendiculares hasta el eje de abscisas. Las intersecciones resultantes corresponden a las composiciones de las fases presentes.

Por ejemplo, nos fijamos en el punto B de la figura, que se encuentra dentro de la región $\alpha+L$. Trazamos la recta de reparto, tal como se indica. La perpendicular desde la intersección de la recta de reparto con la línea de liquidus corta en el eje de abscisas, resultando la siguiente composición: 32% en peso de Ni y 68% en peso de Cu, que es la composición de la fase líquida C_L . Del mismo modo, la recta de reparto intersecciona con la línea de solidus y la perpendicular nos da la composición en la fase sólida C_α , que corresponde a 43% en peso de Ni y 57% en peso de Cu.



3.- Determinación de la cantidad de fases: La cantidad relativa como fracción o como porcentaje, de las fases presentes en el equilibrio se puede calcular mediante los diagramas de fases. Los campos monofásicos y bifásicos se deben tratar separadamente.

La solución es obvia para la región monofásica, ya que sólo existe una fase. El porcentaje es del 100%. Refiriéndonos al punto A de la primera figura en la aleación de 60% en peso de Ni y 40% en peso de Cu a 1100°C, sólo existe la fase α y la aleación es 100% α .

Si el punto composición – temperatura está localizado dentro de la región bifásica, el problema se complica un poco. La recta de reparto debe utilizarse conjuntamente con un procedimiento que denominamos **regla de la palanca**, que aplicaremos de la siguiente forma:

- 1.- A la temperatura de la aleación se traza un segmento de recta de reparto a través de la región bifásica.
- 2.- La composición total de la aleación está localizada en el segmento de recta de reparto.
- 3.- La fracción de una fase se calcula midiendo la longitud del segmento de la recta de reparto, desde la composición de la aleación hasta el límite de la otra fase, y dividiéndola por la longitud total del segmento de isoterma.
- 4.- La fracción de la otra fase se determina del mismo modo.
- 5.- Si lo que interesa son los porcentajes de fases, se multiplican por 100 las fracciones de fase.

La longitud del segmento de la recta de reparto se mide con la ayuda de una regla, o bien restando los valores de composición que figuran en el eje de abscisas.

Fijándonos ahora en el punto B de la última figura, la aleación Cu – Ni tiene una composición de 35% en peso de Ni y 65% en peso de Cu a 1250°C, coexistiendo dos fases α y L. La dificultad radica en calcular la proporción de ambas.

La composición de la aleación viene dada por el punto C_0 , al que corresponden unas fracciones de masa de las fases que llamaremos ω_L y ω_α , que calcularemos aplicando la regla de la palanca:

$$\begin{aligned}\omega_L \cdot R &= \omega_\alpha \cdot S \\ \omega_L + \omega_\alpha &= 100\end{aligned}$$

$$\text{De donde: } \omega_L = \frac{S}{R+S} \cdot 100 \quad \text{y} \quad \omega_\alpha = \frac{R}{R+S} \cdot 100$$

$$\text{Podemos obtener } \omega_L \text{ restando las composiciones como: } \quad \omega_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

Donde $C_\alpha = 43\%$ en peso de Ni; $C_0 = 35\%$ en peso de Ni; y $C_L = 32\%$ en peso de Ni. Sustituyendo obtenemos:

$$\omega_L = \frac{43 - 35}{43 - 32} = 0,73$$

De igual modo calculamos la fase α :

$$\omega_\alpha = \frac{R}{R+S} = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L} = \frac{35 - 32}{43 - 32} = 0,27$$

Resumiendo, si conocemos la temperatura y la composición y se ha alcanzado el equilibrio, **la regla de las fases se emplea para determinar las cantidades relativas o fracciones de fases en los campos bifásicos de aleaciones binarias**. Es fácil confundir los procedimientos de determinación de composición de las fases con los de cantidades relativas de fases presentes. La composición de las fases se expresa en términos de concentración de los componentes. En una aleación monofásica, la composición de la fase coincide con la composición total de la aleación. En una aleación bifásica debemos utilizar la recta de reparto, cuyos extremos determinan las

$$\omega_s = \frac{\overline{nn_L}}{n_s n_L} = \frac{C_n - C_{nL}}{C_{nS} - C_{nL}} = \frac{70 - 55}{100 - 55} \cdot 100 = 33,3\% \text{ de la fase s\u00f3lida.}$$

d) En el punto d se tienen cristales de concentraci\u00f3n $d_s = A - B \ 100 - 0$, y el resto ser\u00e1 l\u00edquido, cuya concentraci\u00f3n es la del punto c; es decir, el de la aleaci\u00f3n eut\u00e9ctica $d_L = A - B \ 40 - 60$.

$$\omega_L = \frac{\overline{d_s d}}{d_s c} = \frac{C_{dS} - C_d}{C_{dS} - C_c} = \frac{100 - 70}{100 - 40} \cdot 100 = 50\% \text{ de la fase l\u00edquida.}$$

$$\omega_s = \frac{\overline{d c}}{d_s c} = \frac{C_d - C_c}{C_{dS} - C_c} = \frac{70 - 40}{100 - 40} \cdot 100 = 50\% \text{ de la fase s\u00f3lida.}$$

e) A partir del punto d hacia abajo, las aleaciones est\u00e1n formadas por cristales de A, formados entre b_L y d (cristales primarios de A), y de cristales mixtos de B+A (secundarios de A). Las concentraciones ser\u00e1n el 30% del total de B y 70% de A, subdividido en 50% de A primario y $70 - 50 = 20$ de A secundario.

f) En una aleaci\u00f3n eut\u00e9ctica resulta:

- 1.- En un punto e dentro del campo L, la aleaci\u00f3n se encuentra en estado l\u00edquido y los componentes totalmente disueltos; el porcentaje es el de la aleaci\u00f3n $A - B \ 40 - 60$ y hasta el punto c.
- 2.- Al llegar al punto c comienzan a cristalizar, al mismo tiempo, cristales del componente A y del componente B, \u00edntimamente mezclados, formando cristales mixtos de composici\u00f3n total eut\u00e9ctica.
- 3.- Por debajo de c no hay cambio alguno.

Las aleaciones eut\u00e9cticas tienen la gran ventaja de fundir a la m\u00e1s baja temperatura posible de estas aleaciones; por tanto, son las m\u00e1s id\u00f3neas para fabricar piezas fundidas, por llenar mejor los moldes y ser m\u00e1s homog\u00e9neas.

g) Vamos a estudiar, por \u00faltimo, una aleaci\u00f3n con mayor contenido de B que las eut\u00e9cticas:

- 1.- En el punto k se tiene l\u00edquido homog\u00e9neo de concentraci\u00f3n igual a la de aleaci\u00f3n.
- 2.- En d comienza la formaci\u00f3n de fase s\u00f3lida de cristales de componente B, en contacto con la fase l\u00edquida.
- 3.- En el punto p coexisten dos fases, la l\u00edquida y la s\u00f3lida. La s\u00f3lida est\u00e1 formada por cristales puros de B. La l\u00edquida, de aleaci\u00f3n $A - B$ con concentraci\u00f3n $p_L = A - B \ 32,5 - 67,5$.

La cantidad relativa de ambas fases se obtiene, como en casos anteriores:

$$\omega_L = \frac{\overline{pp_S}}{p_L p_S} = \frac{C_p - C_{pS}}{C_{pL} - C_{pS}} = \frac{25}{32,5} \cdot 100 = 77\% \text{ fase l\u00edquida.}$$

$$\omega_s = 100 - 77 = 23\% \text{ fase s\u00f3lida, cristales B.}$$

4.- Al llegar a q, la fase líquida tiene una concentración $c = A - B$ 40 – 60, la de la eutéctica; mientras que la sólida continua siendo de cristales de elemento puro B. Las cantidades de una y otra son:

$$\omega_L = \frac{\overline{q}q_s}{\overline{c}q_s} = \frac{C_q - C_{qs}}{C_c - C_{qs}} = \frac{25}{40} \cdot 100 = 62,5\% \text{ fase líquida.}$$

$$\omega_s = 100 - 62,5 = 37,5\% \text{ fase sólida, cristales B.}$$

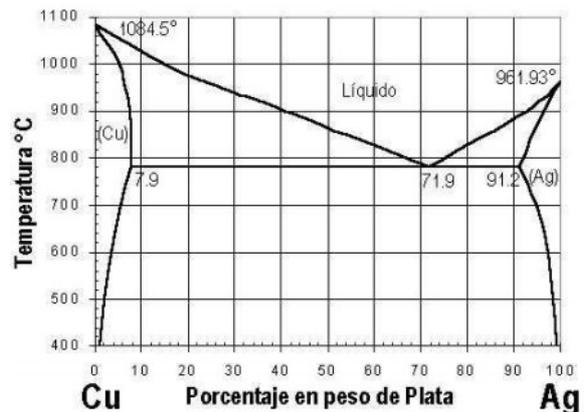
5.- Al llegar a este punto, en que la concentración de la fase líquida es la eutéctica, toda ella se transforma en fase sólida formada por cristales mixtos del elemento A y el B, de concentración eutéctica. Así pues, en esta zona se hallan en equilibrio cristales de B libres y cristales mezclados de A y B. Lo mismo sucede con todas las aleaciones comprendidas entre la aleación eutéctica y la de 100% de B.

Vídeo explicativo de este tipo de diagramas:

<https://www.youtube.com/watch?v=htC6RURWnOY>

DIAGRAMA DE EQUILIBRIO EN ALEACIONES TOTALMENTE SOLUBLES EN ESTADO LÍQUIDO Y PARCIALMENTE SOLUBLES EN ESTADO SÓLIDO

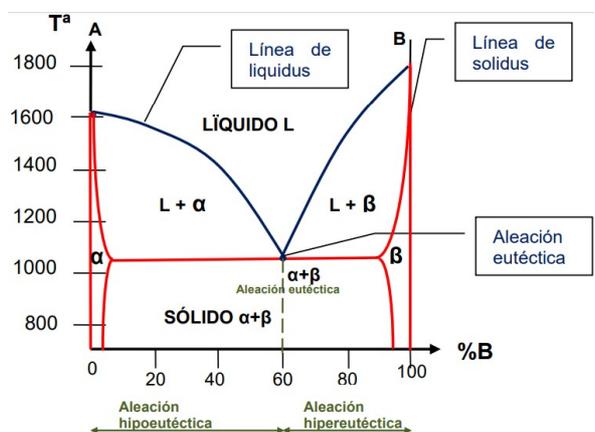
La mayor parte de los metales de uso industrial presentan alguna solubilidad entre sí al alearse. Para pequeñas proporciones de uno de los componentes respecto al otro, hay solubilidad total y se forman soluciones sólidas que llamaremos α y β . Por ejemplo: en la aleación Cu – Ag, el cobre no es capaz de solubilizar más de un 7.9 % de Ag. Y la plata sólo solubiliza como máximo un 8,8 % de Cu.



Las aleaciones α y β , son las aleaciones formadas entre el Cu y la Ag, con las solubilidades posibles. Pero al aumentar las concentraciones de alguno de los componentes, ya no hay posibilidad de mezclarse y el caso es similar al de insolubilidad total. Se consigue una aleación sólida con dos fases α y β , que no se mezclan entre sí.

En estos sistemas los metales son solubles pero en pequeña cantidad (parcialmente solubles). Al solidificar aparecen soluciones sólidas α y β .

α = solución sólida de B disuelto en A (muchas cantidad de A y poca de B)
 β = solución sólida de A disuelto en B (muchas cantidad de B y poca de A)



A la temperatura eutéctica las fases sólidas que se forman son soluciones α y β . Se observa en el diagrama que ocurren transformaciones en estado sólido.

El diagrama se divide en seis zonas:

- En la **zona L** hay una sola fase, líquida y homogénea.
- En la **zona L+ α** hay dos fases, una de líquido y otra de cristales de aleación sólida α (sólido α con solubilidad parcial)
- En la **zona L+ β** también hay dos fases, una de líquido y otra de cristales de aleación sólida β (sólido β con solubilidad parcial)
- En la **zona α** , hay una fase sólida formada por cristales de aleación sólida α .
- En la **zona β** , hay una fase sólida formada por cristales de aleación sólida β .
- En la **zona $\alpha+\beta$** hay un sólido formado por dos fases α y β , que son soluciones sólidas con solubilidad parcial.

- **En las aleaciones hipoeutécticas**, comienza la solidificación al alcanzar la línea de liquidus, los cristales que solidifican en la zona L+ α son de sólido α , mientras que el líquido que queda se va empobreciendo en A. Al llegar a la temperatura T2 desaparece todo el líquido y la aleación formada contiene cristales de α (proeutéticos), más una estructura compuesta de $\alpha+\beta$ (composición eutéctica). Es la zona $\alpha+(\alpha+\beta)$.

Por debajo de la temperatura T2, disminuye la solubilidad de B en A, por lo que la solución α pierde cristales de B.

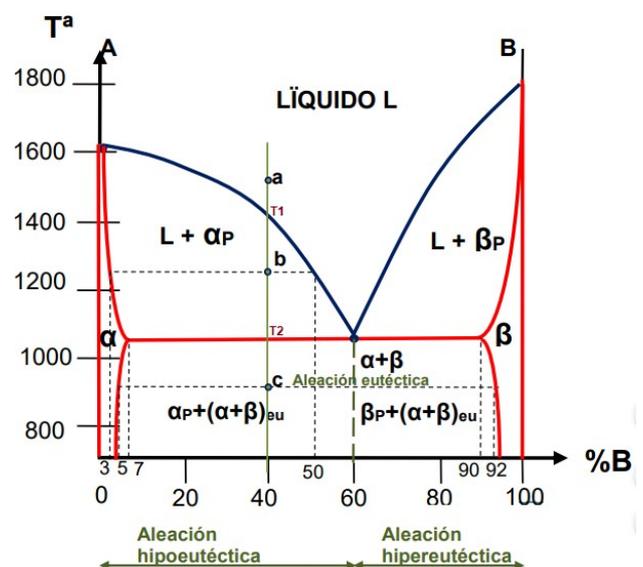
- **En aleaciones hipoeutécticas** con pequeñas cantidades de B, todo el sólido está en forma de α y este sólido no sufre transformaciones, todo es solución sólida α .

- **En la aleación eutéctica** sólo hay un punto de solidificación y toda la aleación pasa de estado líquido a sólido $\alpha+\beta$ a la temperatura T2. Por debajo de esta temperatura disminuye la solubilidad de A y B, por lo que la solución α pierde cristales de B y la solución β pierde cristales de A.

- **En las aleaciones hipereutécticas**, comienza la solidificación al alcanzar la línea de liquidus, los cristales que solidifican en la zona L+ β son de sólido β , mientras que el líquido que queda se va empobreciendo en B. Al llegar a la temperatura T2 desaparece todo el líquido y la aleación formada contiene cristales de β (proeutéticos), más una estructura compuesta de $\alpha+\beta$ (composición eutéctica). Es la zona $\beta+(\alpha+\beta)$ Por debajo de la temperatura T2, disminuye la solubilidad de A y B, por lo que la solución α pierde cristales de B y la solución β pierde cristales de A.

- **En aleaciones hipereutécticas**, con pequeñas cantidades de A, todo el sólido está en forma de β y este sólido no sufre transformaciones, todo es solución sólida β .

Para calcular la composición de cada una de las fases se emplea la regla de la horizontal. Y para calcular la cantidad de cada fase se emplea la regla de la palanca.



Ejemplo: Aleación 60% A y 40% B:

- En el punto "a":

- Numero de fases = 1 (liquido)
- Composición de cada fase: Líquido = 60% A - 40 %B
- Cantidad o proporción de cada fase: $W_{\text{liquido}} = 100 \%$

- En el punto "b":

- Numero de fases = 2 (liquido y sólido α)
- Composición de cada fase: se aplica la regla de la horizontal
Líquido = 50% B y 50% A
Sólido α = 3% B y 97% A
- Cantidad o proporción de cada fase: se aplica la regla de la palanca o de los segmentos inversos:

$$W_{\text{liquido}} = \frac{b-s}{l-s} 100 (\%) = \frac{40-3}{50-3} 100 = 78,7\%$$

$$W_{\text{sólido}} = \frac{l-b}{l-s} 100 (\%) = \frac{50-40}{50-3} 100 = 21,3\%$$

- En el punto "c":

- Numero de fases = 2 (solido α y sólido β)
- Composición de cada fase: se aplica la regla de la horizontal
Sólido α = 5% B y 95% A
Sólido β = 92% B y 8% A
- Cantidad o proporción de cada fase: se aplica la regla de la palanca o de los segmentos inversos.

$$W_{\alpha} = \frac{92-40}{92-5} 100 = 59,8\%$$

$$W_{\beta} = \frac{40-5}{92-5} 100 = 40,2\%$$

Videos diagrama de equilibrio en aleaciones totalmente solubles en estado líquido y parcialmente solubles en estado sólido:

<https://www.youtube.com/watch?v=n1z5rvuZUqo>

Videos diagrama Fe-C:

<https://www.youtube.com/watch?v=QvzcOncirMg>

https://www.youtube.com/watch?v=CUAobP_DOYk&pbjreload=10

GLOSARIO TÉCNICO

Aleación: Mezcla homogénea de dos o más elementos químicos. La aleación posee carácter metálico y al menos uno de sus componentes debe ser un metal.

Componentes de una aleación: elementos químicos que intervienen en su formación. Se simbolizan por su símbolo químico o genéricamente con letras mayúsculas: A, B, ...

Composición de una aleación: tanto por ciento en peso de sus componentes.

Constituyentes: son los distintos componentes de los granos de una aleación. En ocasiones los componentes químicos se agregan formando constituyentes definidos. Por asociación de estos constituyentes se forman los granos de la aleación. Ejemplos son los constituyentes de los aceros: ferrita, cementita, perlita, etc.

Fase: porción de un sistema material homogéneo con características físicas y químicas uniformes, separado físicamente. Las fases pueden ser disoluciones líquidas (simbolizadas como L) o disoluciones sólidas (simbolizadas con letras griegas: α , β , ...)

Sistema isomorfo: diagrama de fases donde sólo existe una fase sólida, esto es, hay sólo una estructura en estado sólido. Sus componentes son solubles en estado líquido y en estado sólido.

Líquidus: temperatura a la cual el líquido empieza a solidificar bajo las condiciones de equilibrio.

Sólidus: temperatura durante la solidificación de una aleación a la cual el final de la fase líquida solidifica.

Reacción eutéctica: transformación de fases en la cual toda la fase líquida se transforma por enfriamiento en dos fases sólidas isotérmicamente.

Temperatura eutéctica: temperatura a la que se produce la reacción eutéctica.

Fase proeutéctica: la que se forma a una temperatura por encima de la eutéctica.

Reacción eutectoide: transformación de fases en la cual una fase sólida se transforma por enfriamiento en dos fases sólidas distintas isotérmicamente.

SOLUCIONES BOLETÍN DIAGRAMAS DE FASES

1.-

a) E: Punto eutéctico.

α : Fase sólida del Cadmio.

β : Fase sólida del Bismuto.

α_p : Fase α proeutéctica.

β_p : Fase β proeutéctica.

$\alpha_E + \beta_E$: Fases α y β eutécticas.

b) $T_{is} = 235 \text{ }^\circ\text{C}$;

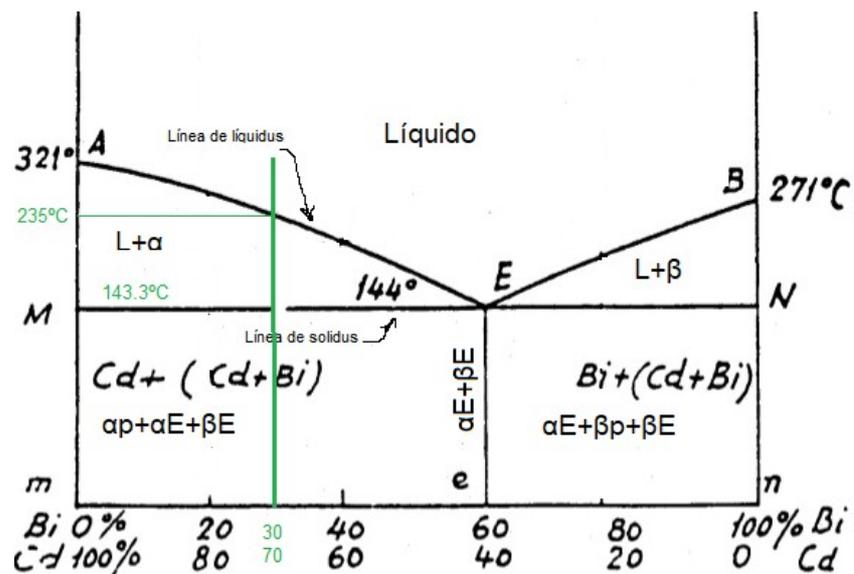
$T_{fs} = 143,3 \text{ }^\circ\text{C}$;

$C_L = 56\% \text{ Cd}$;

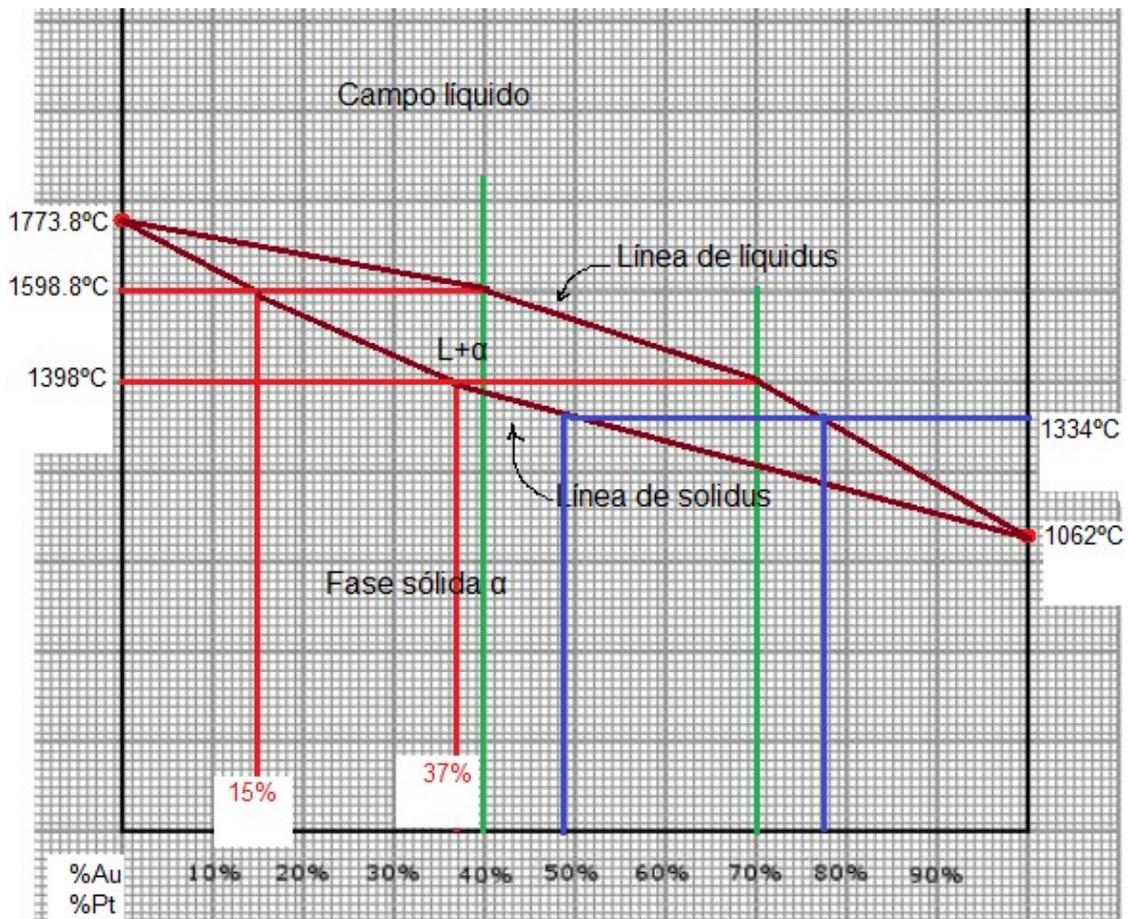
$C_{Cd} = 100\% \text{ Cd}$;

$W_L = 68,18\%$;

$W_{Cd} = 31,82\%$



2.- a)



b) $T_{is} = 1398^\circ\text{C}$; $T_{fs} = 1175^\circ\text{C}$; $C_L = 79\% \text{ Au}$; $C_\alpha = 47\% \text{ Au}$; $W_L = 71,88\%$; $W_\alpha = 28,12\%$

3.-

a) 425°C : Una fase α ; $C_\alpha = [25\% \text{ Pb} - 75\% \text{ Mg}]$
 $W_\alpha = 100\%$;

200°C : Dos fases $\alpha + \text{Mg}_2\text{Pb}$; $C_\alpha = [5\% \text{ Pb} - 95\% \text{ Mg}]$; $C_{\text{Mg}_2\text{Pb}} = [81\% \text{ Pb} - 19\% \text{ Mg}]$
 $W_\alpha = 73,7\%$; $W_{\text{Mg}_2\text{Pb}} = 26,3\%$

b) Dos fases $\beta + L$; $C_\beta = [92\% \text{ Ag} - 8\% \text{ Cu}]$; $C_L = [78\% \text{ Ag} - 22\% \text{ Cu}]$
 $W_L = 50\%$; $W_\beta = 50\%$

c) Dos fases $\alpha + \beta$; $C_\alpha = [4\% \text{ Sn} - 96\% \text{ Pb}]$; $C_\beta = [100\% \text{ Sn}]$
 $W_\alpha = 89\%$; $W_\beta = 11\%$

d) Una fase α ; $C_\alpha = [8,19\% \text{ Sn} - 91,8\% \text{ Pb}]$
 $W_\alpha = 100\%$;

e) Dos fases $\alpha + L$; $C_\alpha = [8\% \text{ Ag} - 92\% \text{ Cu}]$; $C_L = [43\% \text{ Ag} - 57\% \text{ Cu}]$
 $W_\alpha = 34,9\%$; $W_L = 65,1\%$

4.- a) $W_{\alpha\text{primaria}} = 59,4\%$; $W_{\alpha\text{eutéctica}} = 65,1\%$; b) Gráfico de abajo:

5.- $W_{\alpha(\text{ferrita})} = 88,8\%$; $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita})} = 11,2\%$

6.-

a) $W_{\alpha(\text{ferrita proeutectoide})} = 36,1\%$; $W_{\gamma(\text{austenita})} = 63,9\%$

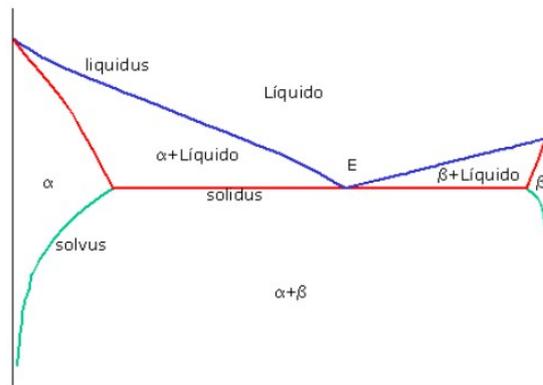
b) $W_{\alpha(\text{ferrita proeutectoide} + \text{eutectoide})} = 92,84\%$;

$W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita})} = 7,16\%$

c) $W_{\alpha(\text{ferrita proeutectoide})} = 36,1\%$;

$W_{\alpha(\text{ferrita eutectoide})} = 56,74\%$

d) Los mismos del apartado anterior.



7.-

a) $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita proeutectoide})} = 7,25\%$; $W_{\gamma(\text{austenita})} = 92,75\%$

b) $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita proeutectoide} + \text{eutectoide})} = 17,64\%$; $W_{\alpha(\text{ferrita})} = 82,36\%$

c) $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita proeutectoide})} = 7,25\%$; $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita eutectoide})} = 10,39\%$

d) Los mismos del apartado anterior.

8.-

a) $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita eutéctica})} = 47,71\%$; $W_{\gamma(\text{austenita})} = 52,29\%$

b) $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita proeutectoide})} = 11,82\%$; $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita eutectoide})} = 59,53\%$; $W_{\gamma(\text{austenita})} = 40,47\%$

c) $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita eutectoide})} = 4,53\%$; $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita total})} = 64,06\%$; $W_{\alpha(\text{ferrita})} = 35,94\%$

9.-

a) % Fe (en peso) = 95,5; % C (en peso) = 4,5

% Fe (en volumen) = 85,69; % C (en volumen) = 14,31

b) Es una fundición hipereutéctica.

c) $V_{\text{total}} = 0,566 \text{ dm}^3$; $\rho_{\text{Aleación}} = 7,14 \text{ kg/dm}^3$

d) $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita proeutéctica})} = 8,33\%$; $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita eutéctica})} = 43,74\%$

$W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita proeutectoide})} = 7,56\%$; $W_{\gamma(\text{austenita})} = 40,37\%$

10.- Justo por encima del eutectoide habrá: $W_{\alpha(\text{ferrita proeutectoide})} = 36\%$; $W_{\gamma(\text{austenita})} = 64\%$.

En el punto eutectoide la austenita se convierte en ferrita eutectoide más cementita eutectoide.

$W_{\alpha(\text{ferrita proeutectoide} + \text{eutectoide})} = 92,84\%$; $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita})} = 7,16\%$

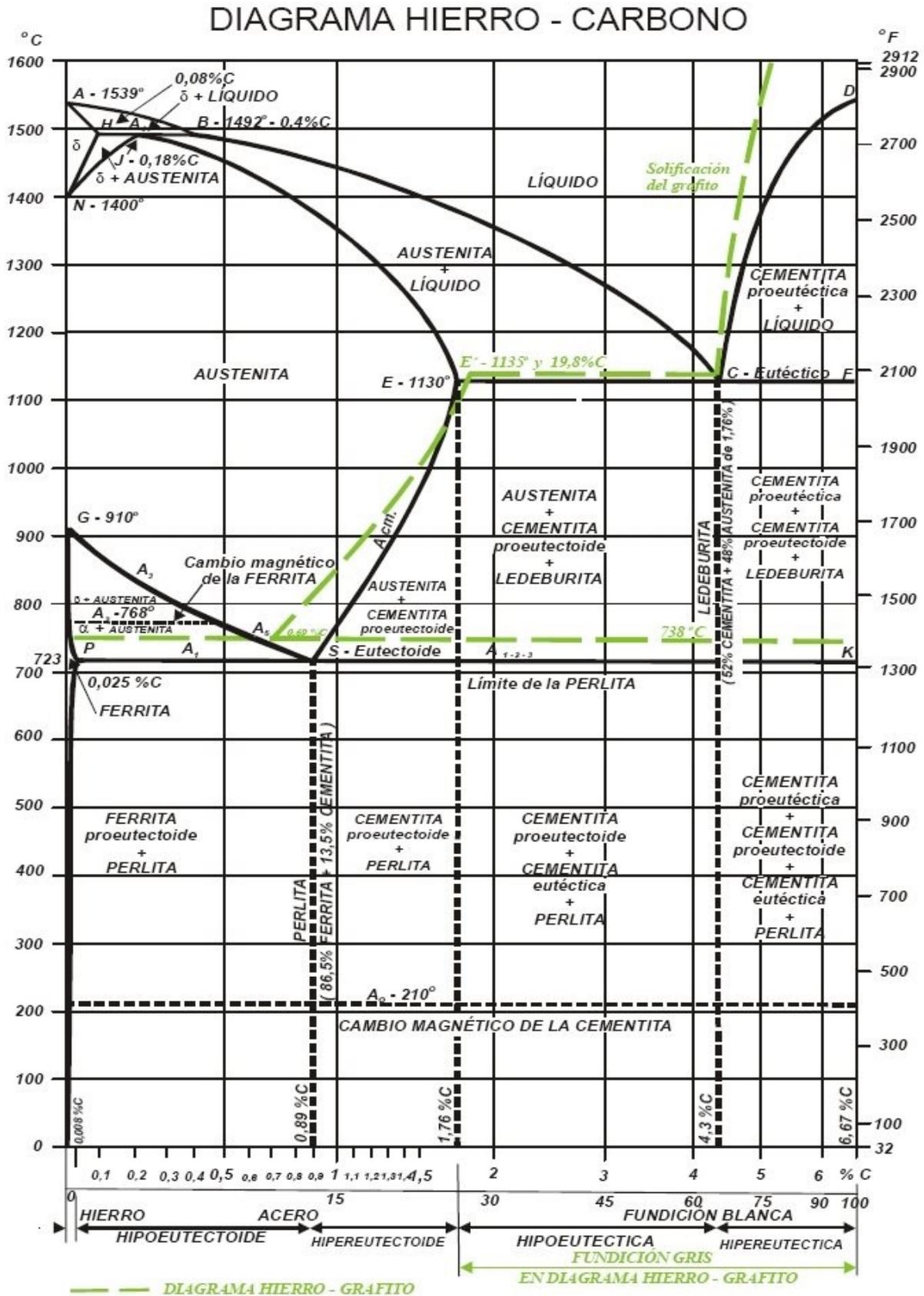
$W_{\alpha(\text{ferrita eutectoide})} = 56,74\%$. Los componentes justo por debajo del eutectoide son ferrita proeutectoide, ferrita eutectoide más cementita eutectoide.

11.- Consideremos una aleación con $0,022\% < \%C < 0,77\%$ lo que conocemos como acero hipoeutectoide.

Partiendo de la fase líquida si vamos enfriando esta fase líquida se convertirá en fase sólida austenita, si seguimos enfriando parte de la austenita se convierte en ferrita, con lo cual estaremos en una zona bifásica en la que tenemos austenita y ferrita proeutectoide, debido a que se forma antes de la reacción eutectoide.

Si continuamos enfriando llegamos a la temperatura donde tiene lugar la reacción eutectoide (727 °C) en la cual la austenita se transforma en perlita que es: cementita (Fe₃C) más ferrita eutectoide. Así, nos encontramos en una región bifásica en la que tenemos ferrita proeutectoide y perlita (cementita más ferrita eutectoide).

12.- a)



b) $W_{\gamma(\text{austenita})} = 98,96\%$; $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita proeutectoide})} = 1,04\%$; $W_{\alpha(\text{ferrita eutectoide})} = 85,76\%$
 $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita total})} = 14,24\%$; $W_{\text{Fe}_3\text{C}(\text{Cementita eutectoide})} = 13,2\%$

13.-

a) $\Delta t = 75 \text{ }^\circ\text{C}$

b) C = 63% Sn – 37% Pb; Aleación eutéctica. T^a constante e igual a $175 \text{ }^\circ\text{C}$.

c) $T^a = 150 \text{ }^\circ\text{C}$: **Dos fases $\alpha+\beta$** ; $C_\alpha = [11\% \text{ Sn} - 89\% \text{ Pb}]$; $C_\beta = [99\% \text{ Sn} - 1\% \text{ Pb}]$
 $W_\alpha = 72,73 \%$; $W_\beta = 27,27\%$

$T^a = 150 \text{ }^\circ\text{C}$: **Dos fases $\alpha+L$** ; $C_\alpha = [12\% \text{ Sn} - 88\% \text{ Pb}]$; $C_L = [39\% \text{ Sn} - 61\% \text{ Pb}]$
 $W_\alpha = 14,81 \%$; $W_L = 85,19\%$

14.-

a) $V = 6,74 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$

b) n° de átomos = 4. Factor de empaquetamiento = 74,23 %.

c) Tiene los siguientes huecos:

Octaédricos: 4

Tetraédricos: 8

d) $\rho_{\text{Ag}} = 10,63 \text{ g/cm}^3$