

## TEMA 2: ALEACIONES. DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO. DIAGRAMA FE-C

### 0. INTRODUCCIÓN

Se llama **aleación** a la mezcla homogénea en estado fundido un metal con al menos otro elemento que puede ser metálico o no, pero el producto final obtenido debe presentar características metálicas.

El componente principal de una aleación metálica será siempre un elemento metálico, que hará prevalecer su estructura cristalina tras la aleación.

Al elemento que está presente en mayor proporción en la aleación se le llama **disolvente** y al que está en menor proporción, **soluto**.

La estructura de una aleación resulta más compleja que la de un metal puro. Las propiedades de las aleaciones dependen de su composición y del tamaño, forma y distribución de sus fases o microconstituyentes. En general, las aleaciones tienen mejores propiedades que el metal puro.

### 1. CRISTALIZACIÓN DE METALES PUROS Y ALEACIONES

La cristalización es el proceso de solidificación del que dependen en gran medida las propiedades del material. Cuando se enfría un metal en estado fundido, llega un momento en que se alcanza la temperatura de equilibrio. Este proceso de cristalización se regula por:

- *Velocidad de nucleación ( $V_n$ ).*- es la cantidad de cristales que se forman por unidad de tiempo.
- *Velocidad de cristalización ( $V_c$ ).*- es el aumento de longitud de los cristales por unidad de tiempo.

Los metales puros solidifican formando una red cristalina a partir de un núcleo central sobre el que se depositan otros en planos perpendiculares (dendritas). Pero éstos no tienen gran utilidad industrial y por eso se forman las aleaciones. Para que se forme una aleación se debe cumplir que los metales sean miscibles en estado líquido y que el resultante mantenga los enlaces metálicos.

### 2. SOLUCIONES SÓLIDAS

Las aleaciones metálicas son soluciones sólidas entre dos o más elementos, siendo el *disolvente* el que entra en mayor proporción y el *soluto* el que lo hace en menor. Pueden ser de dos tipos:

- **Solución por sustitución.**- el disolvente y el soluto forman parte de la red cristalina. Se caracteriza porque ambos átomos deben cristalizar en el mismo sistema y la diferencia entre sus radios atómicos debe ser inferior al 15%. La solubilidad será mayor cuanto menor sea la afinidad química y cuando más próximas sean sus valencias.
- **Solución por inserción.**- los átomos de soluto se colocan en el interior de la red cristalina del disolvente. El soluto suelen ser elementos con menor radio atómico (H, N, C) y el disolvente los metales de transición (Cr, Mn, Fe, Co, Ni). Las estructuras cristalinas que favorecen esta solución son la FCC y la HCP. Son más resistente y duras que los elementos sin alear como por ejemplo, la ferrita (C en Fe  $\alpha$ ) y la austenita (C en Fe  $\gamma$ ).

### 3. SISTEMAS, COMPONENTES Y FASES

Un sistema material es todo elemento, compuesto o conjunto susceptible de sufrir transformaciones físico-químicas. Pueden ser *homogéneos* (se conservan las propiedades físicas en cualquier parte del sistema, sal común en agua) o *heterogéneos* (las propiedades físicas varían en distintas partes del sistema, agua-hiero).

Cada una de las sustancias que forman un sistema se denomina **componente**. Cada una de las partes homogéneas de un sistema que se diferencia físicamente del resto es una **fase**. El número de variables que podemos modificar libremente se llama **grados de libertad**.

Para calcular el número de fases que pueden coexistir en equilibrio en un sistema se utiliza la **regla de las fases de Gibbs**:

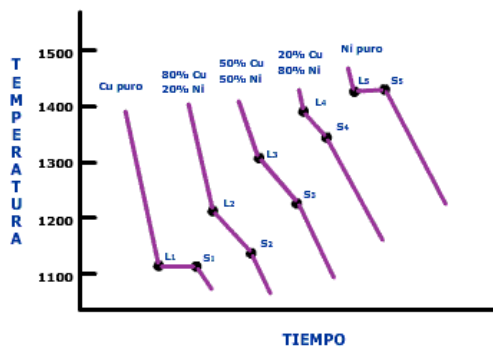
$$F + N = C + 2$$

Siendo:  $F$  = nº de fases;  $N$  = grados de libertad;  $C$  = nº de componentes

#### 4. DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO O DE FASES

Es la representación gráfica de las presiones, temperaturas y composiciones para las cuales las fases son estables. Representan la relación entre la estructura, la composición y el número de fases presentes en el equilibrio, así como de las transformaciones que se producen desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente cuando el calentamiento o el enfriamiento se produce a una velocidad adecuada para que se mantenga el equilibrio.

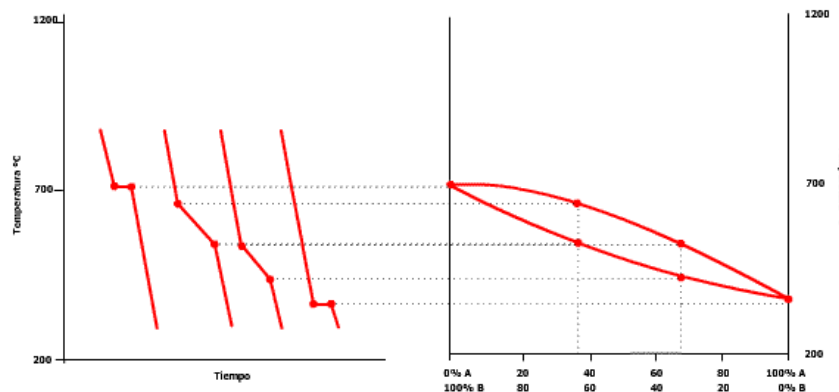
Los diagramas se construyen representando las líneas de enfriamiento para distintas composiciones. Los puntos marcados con **L** corresponden a los valores de temperatura a los que la aleación comienza a solidificar, y los puntos marcados con **S** las temperaturas a partir de las que la aleación es totalmente sólida.



Uniendo todos los puntos marcados con L en el diagrama de enfriamiento anterior se obtiene la **línea de líquidus**, es decir, la línea de temperaturas por encima de las cuales la aleación se encuentra en una zona monofásica, en la que sólo hay líquido, y uniendo los puntos S se obtiene la **línea de sólidus**, línea por debajo de la cual la aleación vuelve a estar en una zona monofásica, pero esta vez sólo encontramos sólido.

En la zona delimitada por las líneas de *líquidus* y de *sólidus* la aleación se encuentra en una zona bifásica, donde coexisten sólido y líquido (L+&).

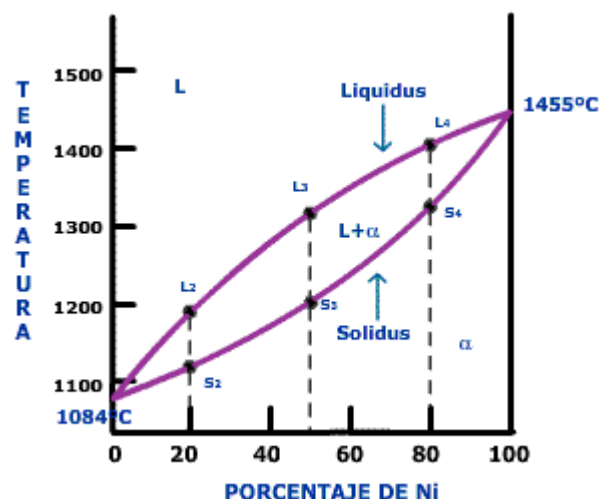
Las composiciones químicas de cada una de las fases se indican mediante la intersección de la isoterma con la línea de límite de fase, y la fracción en peso de cada fase en una región bifásica puede determinarse utilizando la **regla de la palanca** a lo largo de una isoterma a una temperatura determinada.



- **DIAGRAMAS BINARIOS**

El diagrama clásico es el Cu-Ni, en el cual se observan tres zonas delimitadas por dos líneas (*líquidus* y *sólidus*): una sólida, una líquida y una bifásica. La fase L es una disolución homogénea y la fase  $\alpha$  es una disolución sólida por sustitución de estructura FCC.

Son totalmente solubles en estado líquido y en estado sólido, por lo que se dice que el sistema es isomorfo. Las líneas de *sólidus* y *líquidus* cortan a la ordenada de temperatura en los puntos de fusión de los componentes puros.



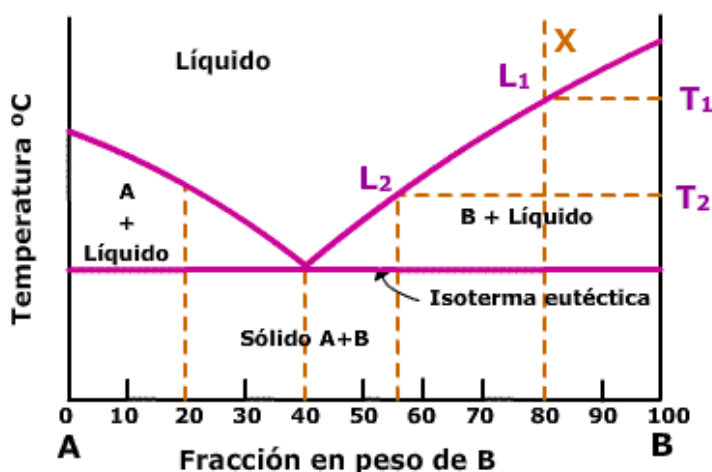
#### 4.1. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE ALEACIONES TOTALMENTE SOLUBLES EN ESTADO SÓLIDO Y LÍQUIDO

Su representación es el diagrama anterior. La interpretación del diagrama indica que en las líneas de *líquidus* y de *sólidus*, así como en la zona bifásica, el número de grados de libertad es uno (según la regla de Gibbs: dos fases y dos componentes), por tanto, se puede variar la concentración o la temperatura, pero si una de éstas se fija, la otra también quedará fijada. Para determinar las concentraciones de cada fase en un punto determinado de la zona bifásica se aplica la ley de la palanca.

#### 4.2. DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DE ALEACIONES TOTALMENTE SOLUBLES EN ESTADO LÍQUIDO E INSOLUBLES EN ESTADO SÓLIDO

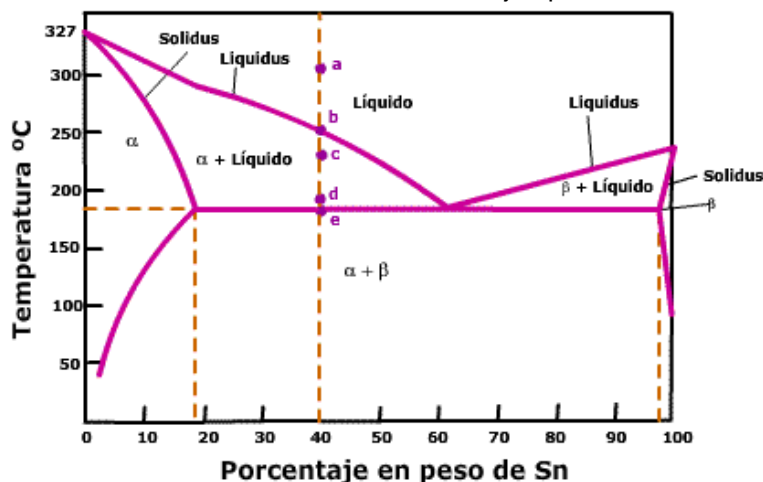
Se caracterizan por un punto llamado **eutéctico**, que es la aleación de punto de fusión más bajo en la cual coexisten las fases sólidas A y B y la fase líquida L. En este punto, el grado de libertad es cero, por tanto, la solidificación se produce a temperatura constante.

El diagrama se divide en cuatro zonas. En la zona L hay una sola fase, líquida y homogénea. En la zona L+A hay dos fases, una de líquido y otra de cristales de aleación A, que forman una aleación hipoeutéctica. En la zona L+B también hay dos fases, una de líquido y otra de cristales de aleación B, que forman una aleación hipereutéctica. Las aleaciones eutécticas funden a una temperatura más baja posible, por tanto, son idóneas para fabricar piezas fundidas.



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

Un caso particular son las aleaciones eutécticas con solubilidad parcial, es decir, los metales presentan una cierta solubilidad en estado sólido. En este caso, a la temperatura eutéctica las fases sólidas que se forman son soluciones  $\alpha$  y  $\beta$ , cuyas composiciones vienen determinadas por los extremos de la línea horizontal. Un ejemplo es la aleación Pb-Sn.



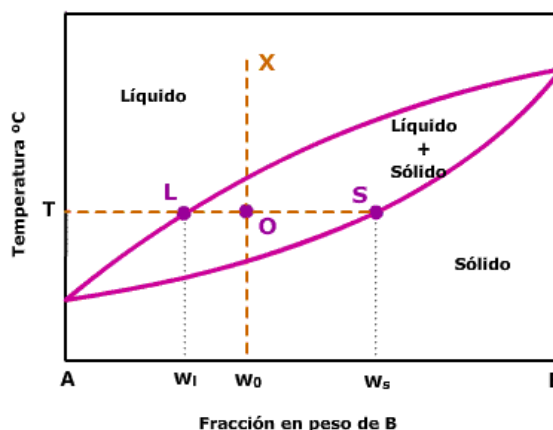
#### 4.4. REGLA DE LA PALANCA

La regla de la palanca es el método empleado para conocer el porcentaje de fase sólida y líquida presentes en una aleación de una cierta concentración cuando se encuentra a una determinada temperatura.

El protocolo a seguir consiste en trazar la línea vertical X (por la concentración que deseamos analizar) y la línea isoterma de la temperatura indicada, línea horizontal L-O-S, en el diagrama de equilibrio de la aleación AB. Determinando su intersección el punto O y la intersección con las líneas de líquidus y sólidus los puntos L y S.

Proyectando sobre el eje de concentraciones dichos puntos de intersección se obtienen las concentraciones de la fase líquida,  $w_L$  y de la fase sólida,  $w_S$ . La concentración de la muestra que vamos a estudiar es  $w_0$ .

Una vez determinadas estas concentraciones, se aplica la regla de la palanca para obtener el porcentaje de cada una de las fases en las condiciones del problema. El resultado de la suma de ambas debe ser el 100%



$$\% \text{ de fase sólida} = \frac{w_0 - w_L}{w_S - w_L}$$

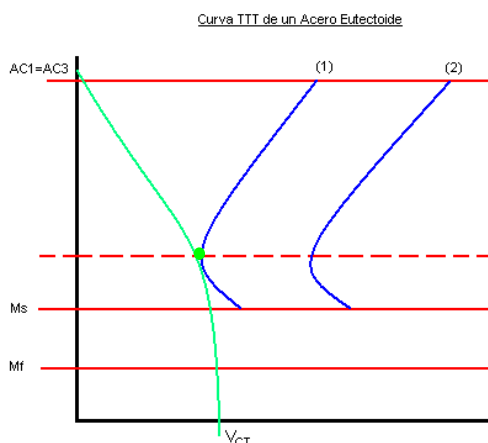
$$\% \text{ de fase líquida} = \frac{w_S - w_0}{w_S - w_L}$$

#### 4.5. CURVAS TTT

Hasta el momento se han descrito diagramas de equilibrio que se refieren a transformaciones que se producen con enfriamientos o calentamientos muy lentos. En ellos se analiza la composición de la aleación.

Las curvas TTT (transformación-tiempo-temperatura) o curvas S de Bain relacionan el tiempo y la temperatura requeridos para una transformación isotérmica. Se basan en calentar las probetas e introducir las después en hornos isotérmicos, mantenidos a diferentes temperaturas, con lo cual sufrirían un enfriamiento instantáneo. Después se anotan los tiempos necesarios y se llevan a un diagrama en cuyo eje de ordenadas se representan las temperaturas de los hornos isotérmicos, y el de abscisas los tiempos de transformación (generalmente en escala logarítmica).

Son muy útiles para entender las transformaciones de un Acero que se enfría isotérmicamente. Así por ejemplo, en el caso del acero, y más concretamente para la fase Austenita, se necesita saber cuánto tiempo requerirá para empezar a transformarse, cuánto tiempo precisará para estar completamente transformada y cuál será la naturaleza del producto de esta transformación.



- (1): Curva Inicial de Transformación
- (2): Curva Final de Transformación
- $V_{CT}$ : Velocidad Crítica de temple
- $M_s$ : Curva Inicial de transformación Martensítica
- $M_f$ : Curva Final de transformación Martensítica
- : Nariz Perlítica

## 5. ALEACIONES HIERRO-CARBONO

El hierro puro tiene muy pocas aplicaciones industriales, pero formando aleaciones con carbono y otros elementos, es el metal más utilizado en la industria actual. Es aquí donde radica la importancia del estudio de su composición, su constitución y su estructura.

Antes de estudiar los aceros, es importante conocer los distintos estados en los que podemos encontrar el hierro desde su punto de fusión hasta su estructura cristalina:

- **Variedad  $\alpha$ .**- cristaliza en BCC hasta 768 °C en la red cúbica centrada. Disuelve muy poco carbono, un 0,008% a temperatura ambiente. Es magnético.
- **Variedad  $\beta$ .**- cristaliza en FCC. Se encuentra entre 768 °C y 910 °C. Es similar al hierro  $\alpha$  pero no es magnético.
- **Variedad  $\gamma$ .**- cristaliza en BCC. Se encuentra entre 910 °C y 1.400 °C. Disuelve fácilmente el carbono, hasta el 1,76%. Es diamagnético.
- **Variedad  $\delta$ .**- cristaliza entre 1.400 °C y 1.539 °C en la red cúbica centrada. Puede disolver hasta un 0,1% de carbono. No tiene aplicaciones siderúrgicas.

### 5.1. COMPOSICIÓN

A temperatura ambiente, todo el carbono se encuentra en forma de carburo de hierro, excepto un mínimo porcentaje de ferrita. Las aleaciones cuyo contenido de carbono está entre 0,08% y 1,76% se denominan aceros. Si la composición es superior al 1,76% se denominan fundiciones. La máxima proporción de carbono que se puede disolver es 6,67% (cementita).

La introducción del carbono en el Fe modifica las propiedades de este de forma muy significativa y es necesario conocer que ocurre en los aceros al aumentar el % de C. La primera clasificación de los aceros la realizaremos de acuerdo a su estructura de equilibrio.

- **Hipoeutectoides:** Menos de 0.8%C (estructura de ferrita y perlita).
- **Eutectoides:** 0.8%C (estructura de perlita).
- **Hipereutectoides:** Mas de 0.8%C y menos de 2.14%C (estructura de cementita y perlita).

Según aumenta el contenido de carbono se produce una deformación mayor en las redes cristalinas, en las soluciones sólidas y da lugar a la aparición de cementita ( $Fe_3C$ ), constituyente muy duro y frágil, en mayor cantidad.

### 5.2. ESTRUCTURAS

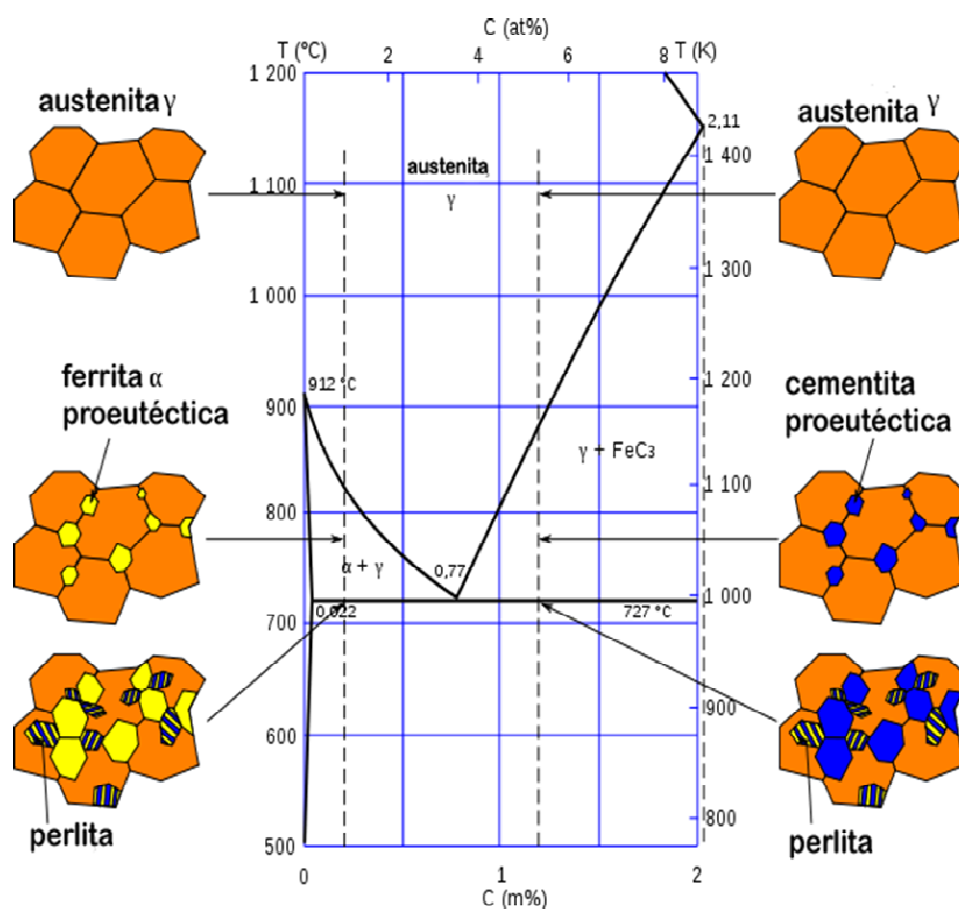
Se distinguen tres tipos de estructuras:

- Estructura cristalina.- no es uniforme, varía según los constituyentes de la aleación.
- Estructura micrográfica.- el elemento fundamental es el grano, por lo que es necesario controlar su formación y desarrollo en los tratamientos térmicos. Cuanto mayor sea el grano, peores son las propiedades de los aceros, excepto la capacidad para trabajarlo en máquinas.
- Estructura macrográfica.- depende de las impurezas que contenga la aleación.

### 5.3. CONSTITUCIÓN

Los constituyentes de la aleación varían en función de la concentración de los componentes químicos y de la temperatura. Los más importantes son:

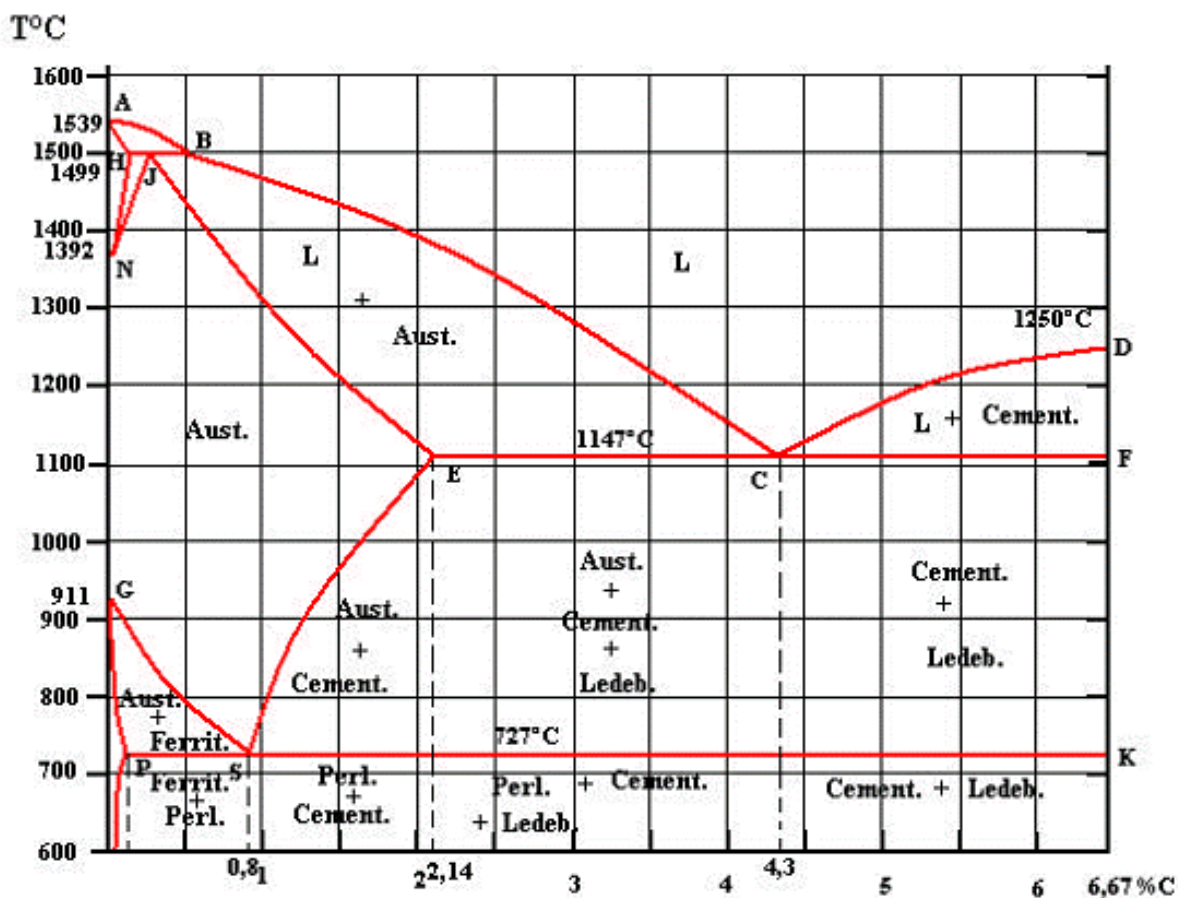
- **Ferrita:** solución sólida de carbono en hierro  $\alpha$ . Es el más blando y dúctil (90 HB). Disuelve muy poco carbono (menos de 0,008%) por lo que se considera hierro  $\alpha$ .
- **Cementita:** es el carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Es el más duro y frágil (800HB).
- **Perlita:** es el microconstituyente eutectoide formado por ferrita (86,5%) y cementita (13,5%). Tiene una estructura laminar si el enfriamiento ha sido lento (sorbítica). Si se vuelve a calentar la cementita forma glóbulos en la ferrita (globular).
- **Austenita:** es una solución sólida por inserción de carbono en hierro  $\gamma$  (hasta 1,76% de C). No se encuentra a temperatura ambiente. Es blando, deformable, tenaz y muy resistente al desgaste. Es el constituyente más denso y no es magnética.
- **Ledeburita:** es una aleación eutéctica de ferrita y cementita. Es propio de las fundiciones.
- **Martensita:** es una solución sobresaturada de carbono en hierro  $\alpha$ . Se obtiene por enfriamiento rápido de la austenita y se presenta en forma de agujas. Después de la cementita, es el más duro y frágil. Tiene propiedades magnéticas.
- **Bainita:** también se produce por una transformación isotérmica de la austenita. Se produce en un temple defectuoso y su fin es la transformación total de la austenita en bainita. Sus propiedades son intermedias entre la perlita y la martensita.



### 5.4. DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

La línea *ABCD* es la línea de líquidus y la línea *AHJECF* es la línea de sólidos. Los puntos más destacables de diagrama son:

- Punto *A*: temperatura de solidificación del hierro puro (1.539 °C).
- Punto *C*: aleación eutéctica (4,3% de C), compuesta por austenita y cementita formando ledeburita.
- Punto *E*: máxima solubilidad de C en Fe  $\alpha$  (1,76% de C).
- Punto *D*: límite del diagrama (6,67% de C), corresponde a la cementita pura (100% cementita).
- Punto *S* ó eutectoide: la austenita se transforma en perlita (0,89% de C).



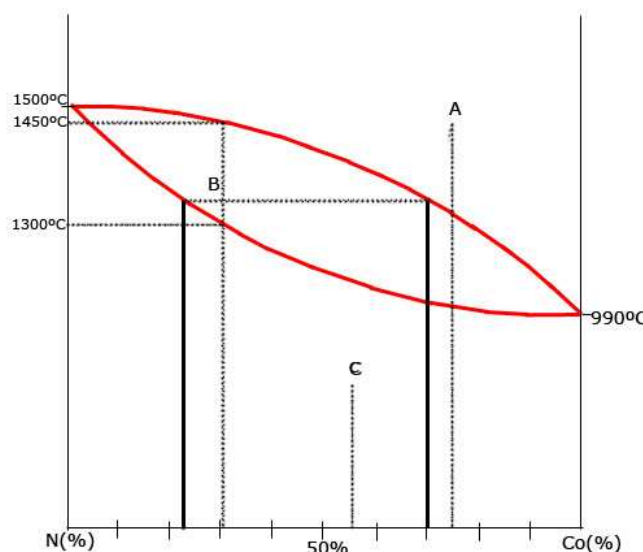
### Ejercicio resuelto

Observando el diagrama de equilibrio de fases de la aleación Ni-Cu adjunto.

a) Indica a qué tipo de aleación corresponde, desde el punto de vista de la solubilidad.

b) Para cada punto A, B y C señalados sobre el diagrama, determina el número de fases, su composición y la cantidad relativa de cada una de ellas.

c) Indica el rango de temperaturas entre los que se produce la solidificación de la aleación correspondiente a la concentración de cada uno de los puntos A, B y C.



### Solución

a) El diagrama corresponde a una aleación totalmente soluble en estado líquido.

b)

**Punto A.-** está situado en una zona monofásica en la que solo hay líquido, con una concentración  $C_L=36\%$  de Ni.

**Punto B.-** tiene una concentración de  $Co=70\%$  de Ni, y está situado en una zona bifásica en la que coexiste líquido, con una concentración  $C_L=30\%$  de Ni, y sólido con una concentración  $C_S=78\%$  de Ni.

Para calcular la cantidad de cada una de las fases lo haremos aplicando la regla de la palanca para un segmento formado por las concentraciones:  $C_L=30\%$  de Ni,  $Co=70\%$  de Ni y  $C_S=78\%$  de Ni.

$$w_L = \frac{C_S - C_o}{C_S - C_L} = \frac{78 - 70}{78 - 30} = \frac{8}{48} = 0,167$$

Por lo que la cantidad de líquido =  $w_L=16,7\%$ .

$$w_S = 1 - w_L = 1 - 0,167 = 0,833$$

Por lo que la cantidad de sólido =  $w_S=83,3\%$ .

**Punto C.-**

Está situado en una zona monofásica en la que solo hay sólido, con una concentración  $C_S=45\%$  de Ni.

c) Una aleación con una concentración  $Co=36\%$  de Ni, el proceso de solidificación comienza para una temperatura de  $1310^\circ C$  aproximadamente y concluye para una temperatura de  $1217^\circ C$  aproximadamente.

Una aleación con una concentración  $Co=70\%$  de Ni, el proceso de solidificación comienza para una temperatura de  $1450^\circ C$  aproximadamente y concluye para una temperatura de  $1300^\circ C$  aproximadamente.

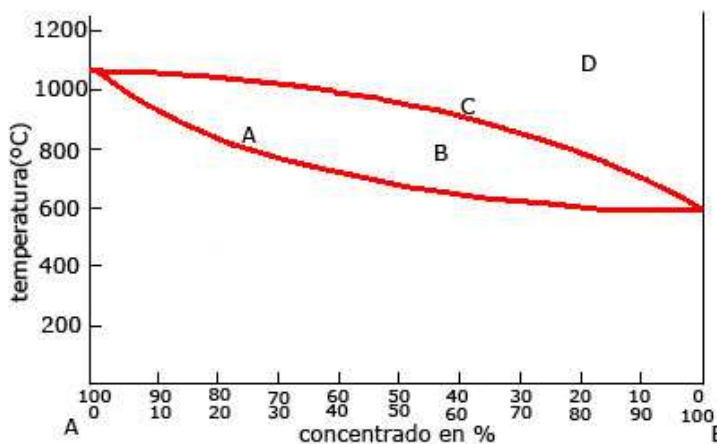
Una aleación con una concentración  $Co=45\%$  de Ni, el proceso de solidificación comienza para una temperatura de  $1360^\circ C$  aproximadamente y concluye para una temperatura de  $1240^\circ C$  aproximadamente.



### Ejercicio 1

A partir del diagrama de equilibrio adjunto:

- Indicar a qué tipo de aleación corresponde, desde el punto de vista de la solubilidad.
- Completar la tabla adjunta, indicando temperatura, concentración y cantidades en porcentaje de fases líquida y sólida en los puntos marcados.

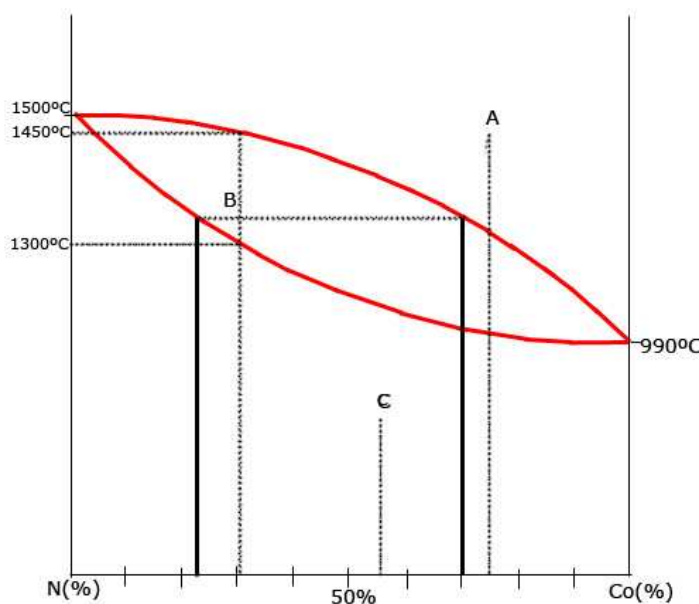


Punto	T <sup>a</sup>	Concentración		Cantidades	
		Aleación	Líquido	Sólido	Líquido
A					
B					
C					
D					

### Ejercicio 2

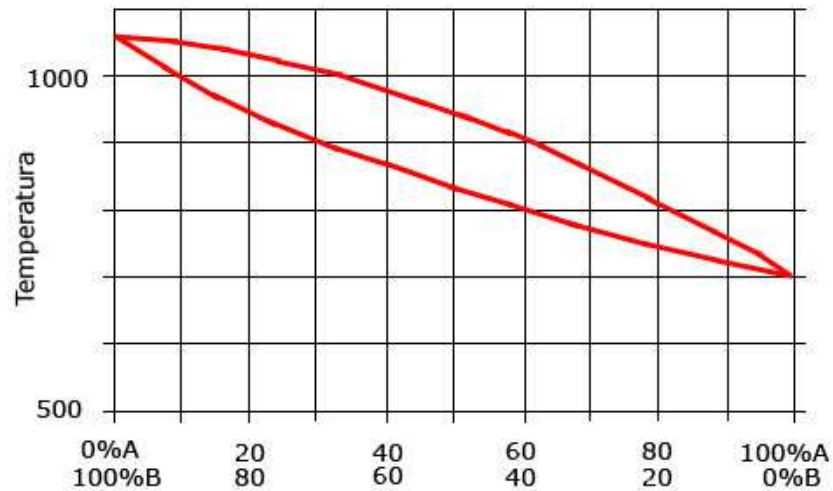
A partir del diagrama Cu-Ni (que corresponde a una aleación totalmente soluble tanto en estado líquido como sólido), para una aleación que se encuentra a una temperatura de 1300°C y tiene una concentración del 50% de Cu; determina: número de fases, composición y cantidades relativas de las fases.

Indica el rango de temperaturas en que se produce la solidificación completa de la aleación.



### Ejercicio 3

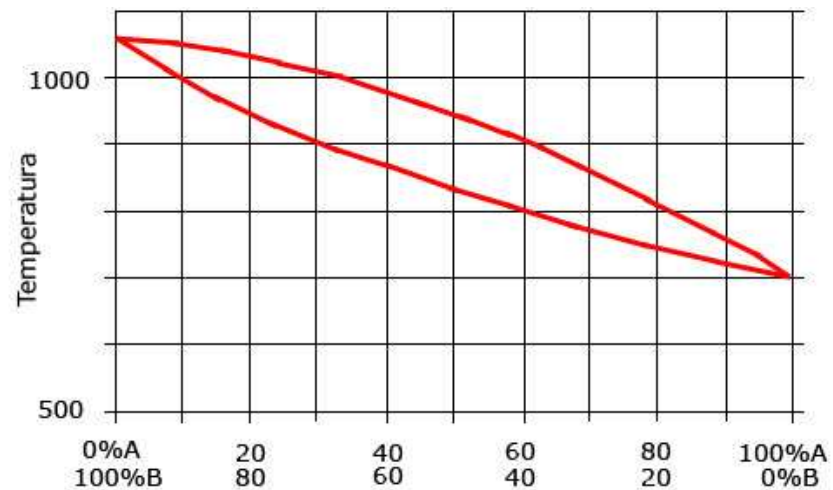
A partir del diagrama de equilibrio de una aleación de dos metales A y B de totalmente solubles tanto en estado líquido como sólido.



Para una aleación de concentración  $C_0=50\%$  de A, realiza un análisis de número de fases, concentración de las fases y cantidades relativas a las temperaturas:  $1000^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}$  y  $800^\circ\text{C}$ .

### Ejercicio 4

A partir del diagrama de equilibrio de una aleación de dos metales A y B de totalmente solubles tanto en estado líquido como sólido.



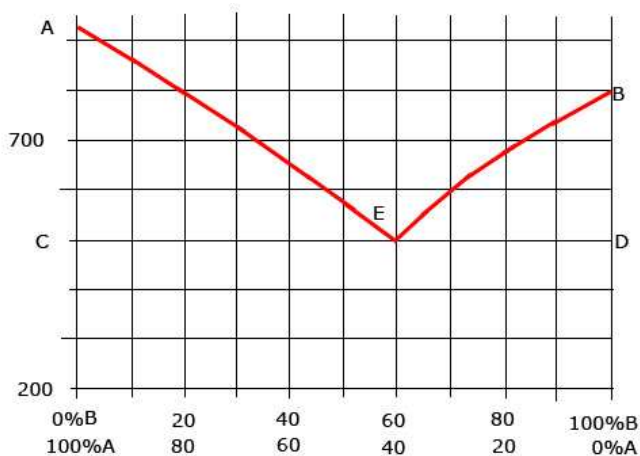
Una aleación de  $C_0=40\%$  de A, se calienta hasta que se encuentra en la zona bifásica. La composición de la fase sólida resulta ser  $C_S=30\%$  de A. Calcular:

- A qué temperatura se encuentra la aleación y cuál es la composición de la fase líquida.
- Cantidades de cada una de las fases.

### Ejercicio 5

A partir del diagrama de equilibrio de fases de la aleación de dos metales A y B, totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estados sólido y con eutéctico.

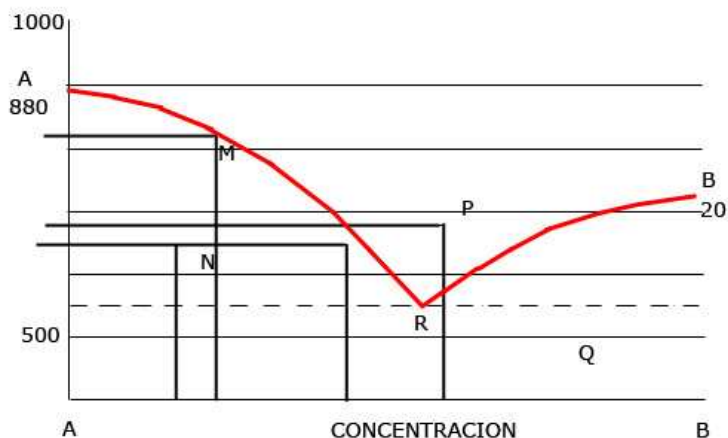
- Indicar: zonas, puntos y líneas significativas del diagrama.
- Para una aleación de concentración  $C_0=40\%$  de A, que se ha calentado hasta la zona monofásica líquido. Analizar todo lo que va ocurriendo durante el proceso de enfriamiento, suficientemente lento, hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- Repetir el apartado anterior para aleación de concentración  $C_0= 80\%$  de A y  $C_0= 20\%$  de A.
- Para una aleación de  $C_0=70\%$  de A que se encuentra a  $600^\circ\text{C}$ , determinar el número de fases y las cantidades estas que están presentes.
- Repetir el apartado anterior si la aleación se encuentra a  $300^\circ\text{C}$ .



### Ejercicio 6

A Partir del diagrama de equilibrio de fases de una aleación de dos metales A y B, totalmente solubles en estado líquido y totalmente insolubles en estado sólido, con un eutéctico.

Observa los puntos señalados con letras mayúsculas sobre el diagrama y determina: temperaturas, concentraciones y cantidades relativas en % de cada una de las fases, de cada uno de los puntos.

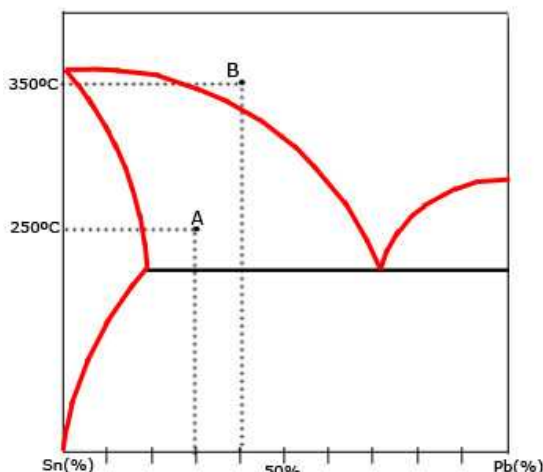


### Ejercicio 7

A Partir del diagrama de equilibrio de fases de la aleación de Sn y Pb, totalmente solubles en estado líquido y parcialmente insolubles en estado sólido, con un eutéctico.

a) Determina el número de fases, su composición y la cantidad relativa, en %, de cada una de ellas, para una aleación con una concentración  $C_0=30\%$  de Pb a una temperatura de  $250^\circ\text{C}$ .

b) Repite el apartado anterior para una aleación  $C_0=60\%$  de Sn a  $350^\circ\text{C}$ .



### Ejercicio 8

A partir del diagrama de equilibrio de fases de la aleación de dos metales A y B, totalmente solubles en estado líquido y parcialmente insolubles en estado sólido, con un eutéctico.

a) Indicar los puntos, líneas y zonas significativas del diagrama. Analizar el número de fases, de constituyentes, su concentración y las cantidades relativas de éstos para los siguientes puntos:

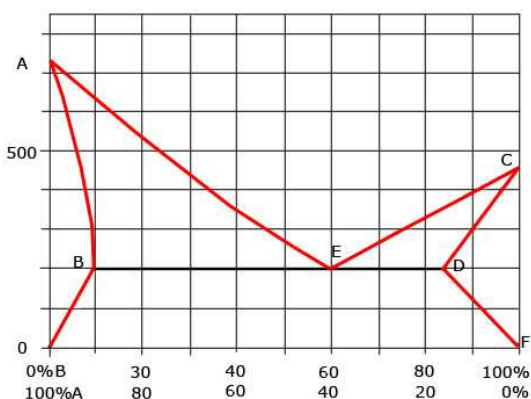
b) En el eutéctico, a  $200^\circ\text{C}$  para  $C_0=40\%$  de A.

c) Para  $400^\circ\text{C}$  y  $C_0=80\%$  de A.

d) Para  $C_0=80\%$  de A.y a una temperatura inmediatamente por encima del eutéctico  $200^\circ\text{C}+\Delta T$ .

e) Para  $C_0=80\%$  de A.y a una temperatura inmediatamente por debajo del eutéctico  $200^\circ\text{C}-\Delta T$ .

f) Para  $100^\circ\text{C}$  y  $C_0=80\%$  de A.



### Ejercicio 9

A partir de las curvas de enfriamiento adjuntas, que pertenecen a la aleación de dos metales A y B.

a) Indica a que tipo de aleación corresponde, razonando la respuesta.

b) Dibuja el diagrama de equilibrio de fases correspondiente.

