

TEMA 2: ALEACIONES. DIAGRAMAS DE EQUILIBRIO.

*Disoluciones sólidas. Aleaciones.

**Cristalización de los metales puros y de las aleaciones.

*Regla de las fases de Gibbs.

*Diagramas de equilibrio de fases. Regla de la palanca.

*1. Diagramas isomórficos binarios. Solubilidad total (tipo 1) en estado líquido y sólido.

**Aplicación a la aleación Cu-Ni.

*2. Diagramas de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en sólido (insolubilidad TOTAL/tipo 2:Bi-Cd/ y PARCIAL/tipo 3:Sn-Pb/).

**Aleaciones hierro-carbono: composición, constitución y estructura.

*3. Diagramas de equilibrio con transformaciones en sólido.

**Análisis del diagrama hierro-carbono.

*Aleaciones férricas.

*Clasificación de los aceros.

*Fundiciones.

Disoluciones sólidas. Aleaciones

Constitución de las aleaciones

Los metales puros tienen poca utilidad en la industria, ya sea por contener impurezas o por no cumplir una serie de especificaciones técnicas. Para conseguir dichas especificaciones y, por tanto, determinadas propiedades, se mezclan los metales puros con otros metales o no metales, formando aleaciones.

Aleación es todo producto que resulta de la unión de dos o más elementos químicos, uno de los cuales tiene carácter metálico. Las propiedades que interesen, como **tenacidad, dureza o conductividad**, se mejoran en la aleación notablemente respecto del metal base.

Se pueden formar aleaciones binarias o de más elementos, por ejemplo el acero constituido por hierro y carbono (Fe, C); y hasta de siete elementos o más, como los aceros rápidos (Fe, C, Co, W, Cr, V y Mo). **ternarias (alnico: Al, Ni, Co)**

Para que el producto resultante de la unión de dos o más elementos químicos tenga carácter de aleación, se tiene que cumplir:

- Que los elementos componentes sean totalmente miscibles en estado líquido, de tal forma que al solidificarse resulte un producto homogéneo.
- Que el producto resultante tenga carácter metálico. Los enlaces metálicos deben permanecer en la aleación.

Disoluciones sólidas. Aleaciones

- En metalurgia se denomina **sistema** a todo elemento, compuesto, o conjunto de elementos o compuestos susceptibles de sufrir transformaciones físico-químicas, las cuales pueden ser estudiadas.

- **Sistemas homogéneos.** Cuando las propiedades físicas se conservan en cualquier parte del sistema. Por ejemplo, una solución de sal común en agua.

- **Sistemas heterogéneos.** Cuando las propiedades físicas de los componentes del sistema varían en las distintas partes del sistema. Por ejemplo, la mezcla agua-hielo está formada por un sólo componente, el agua, pero en dos estados diferentes, líquido y sólido.

- **Sistema isótropo.** Cuando las propiedades físicas son las mismas en todas las direcciones. Por ejemplo, el hormigón armado es un material anisótropo pues en la dirección que se encuentran las barras tiene mayor resistencia a la tracción que en otra cualquiera. El acero forjado es isótropo porque la resistencia a la tracción es igual en todas las direcciones en las que se aplique la fuerza.

- Un sistema puede comportarse como isótropo respecto a una propiedad y anisótropo respecto de otra.

Disoluciones sólidas. Aleaciones⁴

Disolvente y soluto

Inicialmente **1 disolvente** es el componente que entra en mayor proporción, y **sólido** es el que lo hace en menor proporción, **2**, pero cuando los elementos solubles no posean la misma red cristalina, se considera **disolvente al elemento que conserva la red**, aunque se encuentre en menor proporción.

La proporción en la que intervienen el disolvente y el sólido se expresa mediante la **concentración**, generalmente en masa de sólido por masa total de aleación, indicada en forma porcentual, así:

$$\left. \begin{array}{l} m_s \rightarrow \text{masa de sólido} \\ m_D \rightarrow \text{masa de disolvente} \end{array} \right\} \Rightarrow C = \frac{m_s}{m_s + m_D} \cdot 100$$

Ejemplo 1

Se disuelven 85 kg de Co en 1 tm de acero. ¿Cuál es la concentración de W en masa de la solución?

Solución

1 tm de acero son 1 000 kg. Así:

- Cantidad de sólido: 85 kg de Co.
- Cantidad de disolvente: 1 000 kg de acero.
- Cantidad de solución: $85 + 1 000 = 1 085$ kg de aleación.

Concentración de Co en la aleación:

$$C_{Co} = \frac{m_s}{m_s + m_D} \cdot 100 = \frac{85}{85 + 1 000} \cdot 100 = 7,8\% \text{ de Co}$$

Disoluciones sólidas. Aleaciones

Disolvente y soluto

Ejemplo 2

¿Qué cantidad de Co se debe añadir a 1,5 tm de acero para tener una aleación al 8 % de Co?

Solución

$$\left. \begin{array}{l} m_s \rightarrow \text{masa de soluto, } m_{\text{Acero}} = 1500 \text{ kg} \\ m_D \rightarrow \text{masa de disolvente, } m_{\text{Co}} = ? \end{array} \right\} \Rightarrow C = \frac{m_{\text{Co}}}{m_{\text{Co}} + m_{\text{Acero}}} \cdot 100 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 8 = \frac{m_{\text{Co}}}{m_{\text{Co}} + 1500} \cdot 100$$

$$8 \cdot m_{\text{Co}} + 8 \cdot 1500 = 100 \cdot m_{\text{Co}} \Rightarrow 8 \cdot 1500 = 100 \cdot m_{\text{Co}} - 8 \cdot m_{\text{Co}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m_{\text{Co}} = \frac{8 \cdot 1500}{100 - 8} = 130,4 \text{ kg}$$

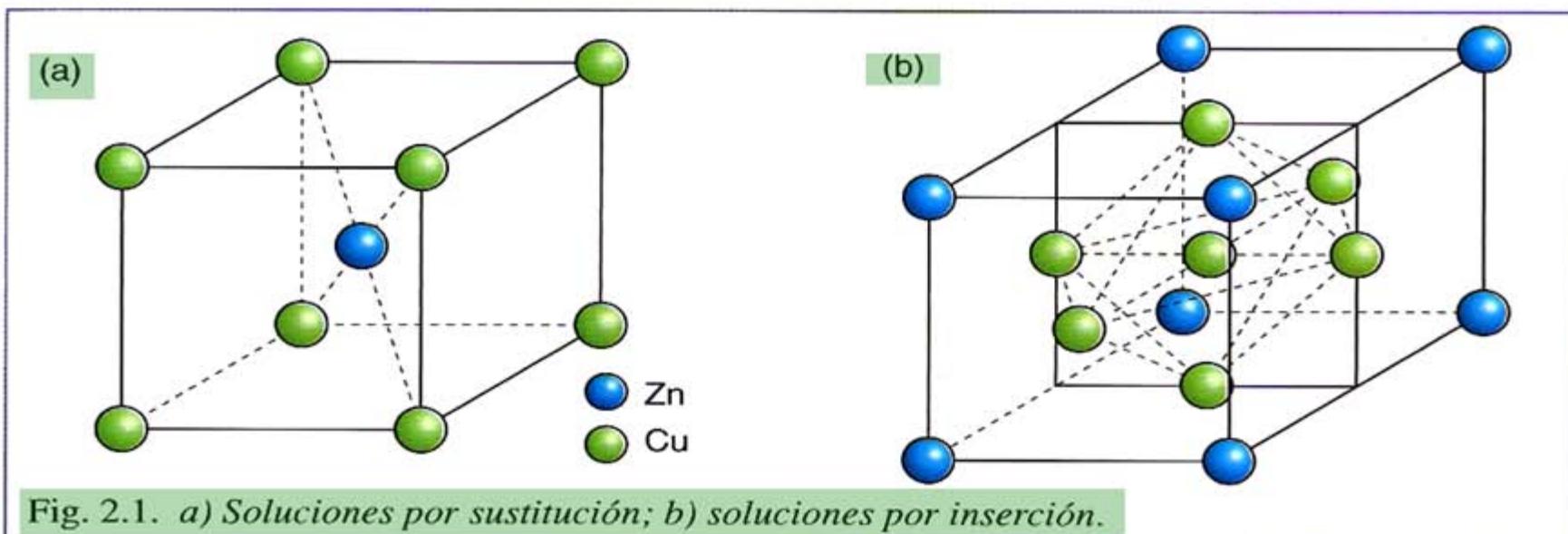
Disoluciones sólidas. Aleaciones

6

Tipos de disoluciones sólidas. Deformaciones en la red cristalina

Las aleaciones metálicas son disoluciones sólidas entre dos o más elementos. Dependiendo de la disposición de los átomos del disolvente y soluto, se dan dos tipos de disoluciones:

- **Solución por sustitución:** los átomos de disolvente y soluto tienen estructura cristalina similar y ambos forman parte del edificio cristalino al reemplazarse átomos del disolvente por átomos del soluto (Fig. 2.1a).
- **Solución por inserción:** se presenta cuando los átomos de soluto son muy pequeños comparados con los átomos del disolvente, y se colocan en el interior, en los intersticios, de la red cristalina del disolvente (Fig. 2.1b).



Disoluciones sólidas. Aleaciones

Tipos de disoluciones sólidas. Deformaciones en la red cristalina

- Si los átomos que sustituyen o que se insertan en la red son de tamaño superior a los sustituidos o a los huecos que presenta la red, ésta se deforma (Fig. 2.2a) provocando tensiones internas semejantes a las que se originan en un ensayo de tracción o a una deformación en frío. Se produce entonces un aumento en el límite elástico. El material aumenta la carga de rotura pero se vuelve más frágil.
- Si en la aleación de sustitución se coloca un átomo de menor tamaño (Fig. 2.2b) sucede una contracción de la red, provocando también la tensión correspondiente y el mismo efecto anterior.

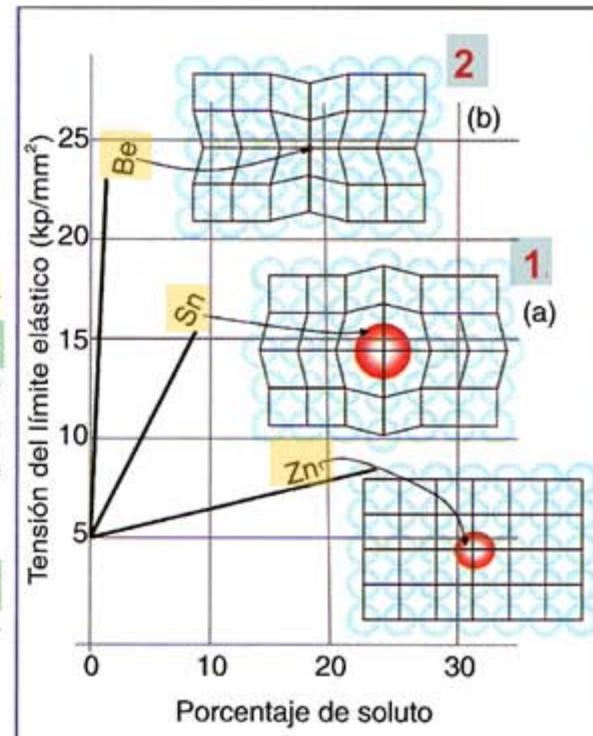
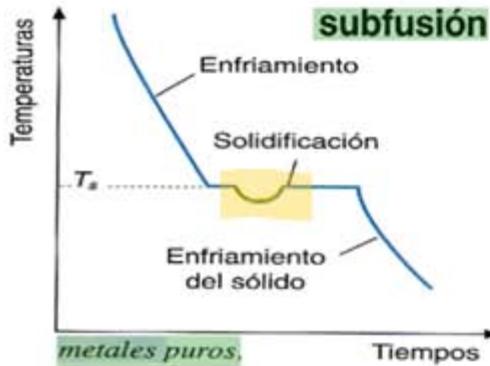


Fig. 2.2. Efecto de la concentración de diferentes elementos de aleación en el límite elástico del cobre. El Zn tiene aproximadamente un tamaño atómico 4 % superior al del Cu, el Sn un 18 % y el Be un 10,5 % inferior. Se observa que este último obtiene resultados más drásticos.

Cristalización de los metales puros y de las aleaciones

8



Se denomina aleación eutéctica a aquella que tiene una composición que hace que se comporte como un metal puro respecto a la solidificación. Es decir, una aleación eutéctica solidifica a temperatura constante.

Solidificación

La cristalización o formación de los cristales tiene lugar mediante un proceso de **solidificación**. En los metales puros la solidificación se hace a temperatura constante (Fig. 2.3a), aunque en determinadas condiciones la masa líquida debe permanecer a una temperatura inferior a la de fusión (fenómeno de **subfusión**, Fig. 2.3b).

La subfusión es un fenómeno inestable, pues una pequeña perturbación hace que comience la solidificación y se absorba energía en forma de calor, justamente la que había cedido al subenfriar.

En los metales con solución de otros elementos, en general, la temperatura no permanece constante en el proceso de solidificación (Fig. 2.3c).

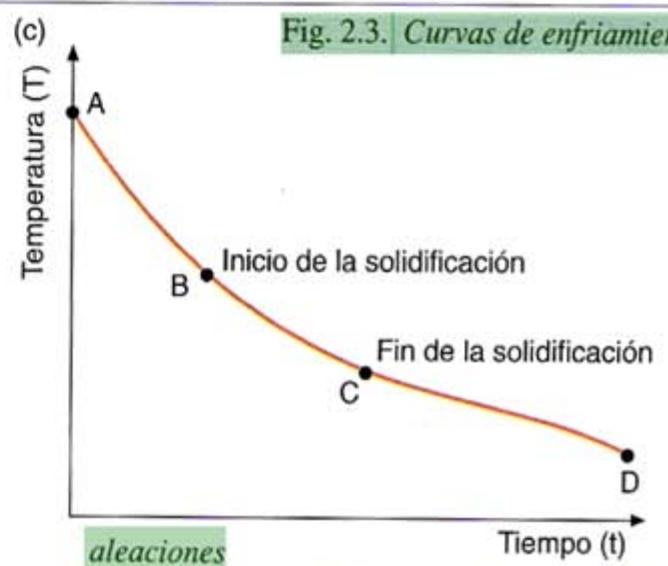
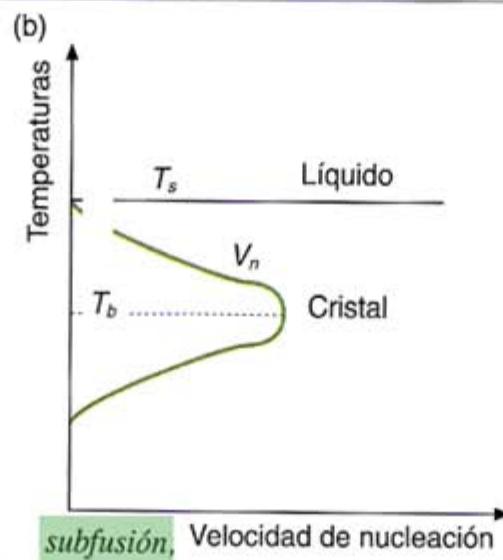
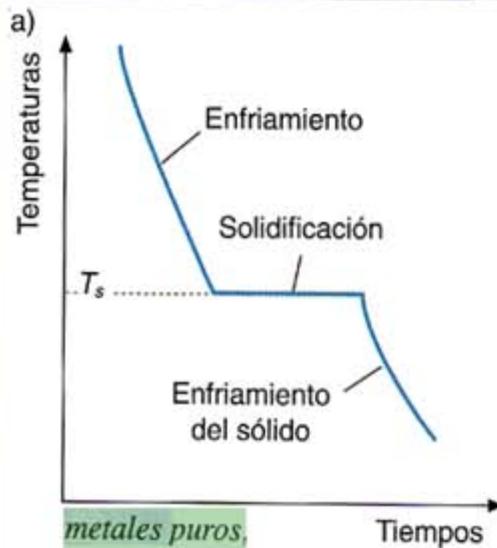


Fig. 2.3. Curvas de enfriamiento

Cristalización de los metales puros y de las aleaciones

Solidificación

Metal	Temperatura de solidificación (°C)	Calor latente de fusión (kcal/kg)	Calor específico a 25 °C (cal/kg · °C)	Subenfriamiento (°C)
Pb	327	5,7	31	80
Mg	650	82,2	250	
Al	660	92,7	215	
Ag	960	24,9	55	250
Cu	1083	48,8	91	236
Ni	1455	72,1	105	480
Fe	1536	65,0	110	420
Pt	1773	27,0	31	332
Ti	1812	87,3	127	
W	3410	44,0	31	

Tabla 2.1. Temperatura de solidificación, calor latente de fusión, calor específico y subenfriamiento de algunos metales (los datos pueden variar ligeramente según la fuente consultada).

Energía necesaria para llevar un metal al estado líquido

- Puesto que los metales no se encuentran en estado líquido es preciso realizar una **fusión** de éstos. Vamos a calcular, sin tener en cuenta las pérdidas, la energía precisa para su fusión desde la temperatura de 25 °C, dicha **energía** es *la precisa para elevar la temperatura desde 25 °C hasta la temperatura de fusión*, dada por:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t$$

Donde: Q = energía que se debe aportar para elevar la temperatura hasta la de fusión.

m = masa de metal a fundir.

c = calor específico del metal a fundir.

Δt = variación de temperatura hasta alcanzar la de fusión.

- La necesaria para el cambio de estado, dada por:

$$Q = m \cdot C$$

Donde: Q = energía necesaria para el cambio de estado.

m = masa de metal a fundir.

C = calor latente de fusión.

Cristalización de los metales puros y de las aleaciones

- Solución sólida.** Fase sólida que contiene una mezcla de más de un elemento, los cuales se combinan para presentar una composición uniforme en todas partes.
- Subenfriamiento.** Temperatura a la cual el metal líquido debe enfriarse por debajo de la temperatura de solidificación antes de que ocurra la nucleación.

Energía necesaria para llevar un metal al estado líquido

Ejemplo 3

Calcular la energía precisa para fundir 1 tm de Al.

Solución

La energía que se debe aportar para subir la temperatura desde 25 °C a la de fusión es:

$$Q = m c \Delta t = 1\,000 \text{ [kg]} \cdot 0,215 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \cdot (660 - 25) [\text{°C}] = 136\,525 \text{ kcal}$$

La energía para el cambio de estado viene dada por:

$$Q = m C = 1\,000 \text{ [kg]} \cdot 92,7 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right] = 92\,700 \text{ kcal}$$

La energía total precisa es $Q = 136\,525 + 92\,700 = 229\,225 \text{ kcal}$.

Si esta energía la expresamos en kwh (1 kwh = 861,24 kcal), el valor equivalente es:

$$Q = \frac{229\,225 \text{ [kcal]}}{861,24 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{kWh}} \right]} = 266 \text{ kwh}$$

Obsérvese cómo, en este caso, hace falta más energía para llevar el metal hasta la temperatura de fusión que la estrictamente precisa para el cambio de estado. Hace falta mucha más energía para conseguir la fusión completa, ya que gran parte se pierde a través de las paredes del horno y, además, hay que elevar la temperatura bastante por encima del punto de fusión para que el metal no comience a solidificar hasta que sea utilizado el metal líquido.

Cristalización de los metales puros y de las aleaciones

12

Etapas de solidificación

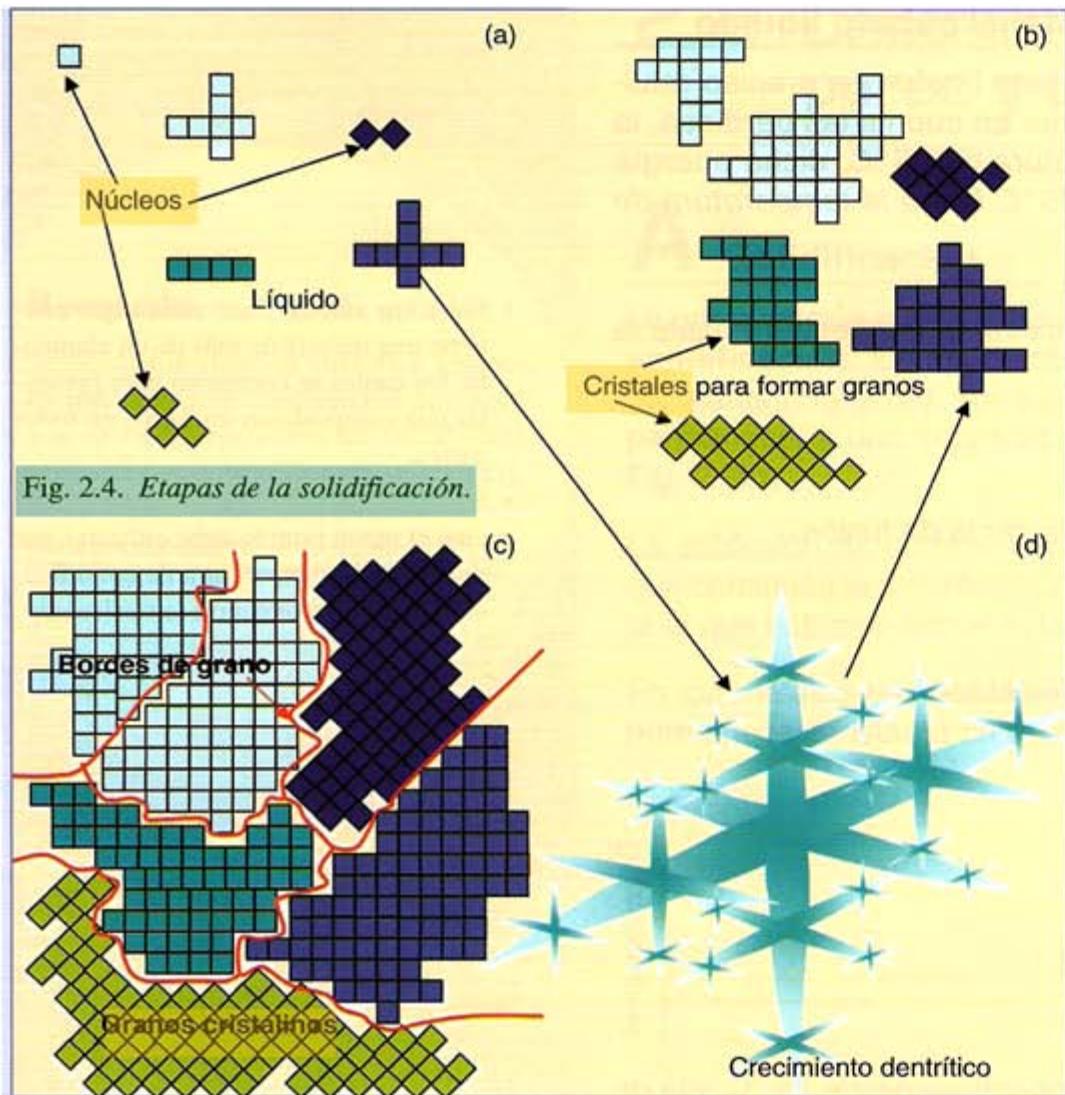


Fig. 2.4. Etapas de la solidificación.

a) **Nucleación** o formación de núcleos estables (Fig. 2.4a). Para ello es preciso un subenfriamiento de forma que los embriones iniciales de sólido puedan crecer y proporcionar auténticos núcleos, pues en otro caso el sólido embrionario se volvería a fundir.

b) **Cristalización** o crecimiento del núcleo (Fig. 2.4b) en las tres direcciones del espacio, en las denominadas **dentritas** (Fig. 2.4d), para dar origen a cristales.

c) **Formación del grano.** Los cristales anteriores van dando a su vez origen a una estructura granular que se junta con la que proviene de otro lugar en los límites de grano (Fig. 2.4c). En metalurgia interesa que el tamaño de estos granos cristalinos sea pequeño ya que se obtienen mejores propiedades mecánicas, es decir, que exista un mayor número de núcleos de cristalización.

Las condiciones de solidificación para formar cristales solamente se alcanzan con velocidades de enfriamiento muy lentas, pues los cambios de temperatura deben permitir el reajuste de los átomos para alcanzar la estructura estable. Por ello, cuando la velocidad de enfriamiento es muy rápida se obtiene lo que se denomina **líquido subenfriado o sólido amorfo**.

Para aumentar la velocidad de formación de núcleos de cristalización se suele añadir al metal fundido los denominados **afinadores de grano**; con ello se obtienen más núcleos y, por tanto, cristales más finos.

Etapas de solidificación

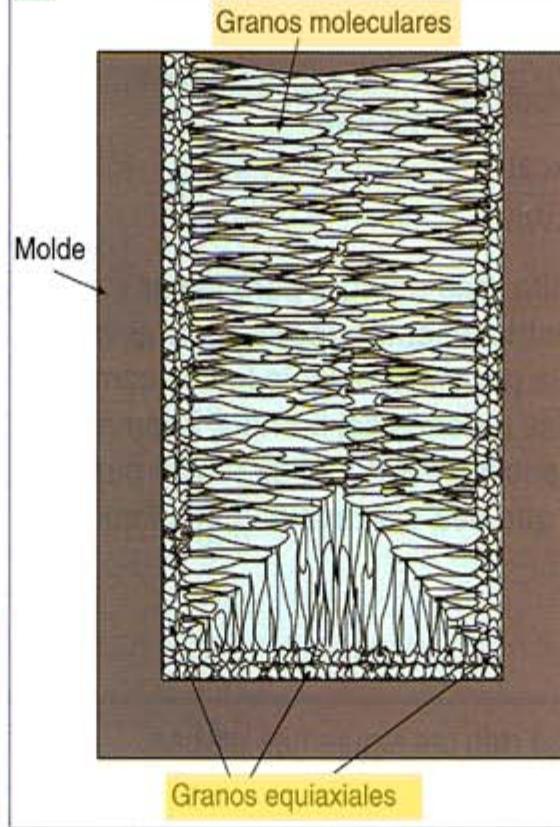
1. Cuando los metales solidifican en un molde (Fig. 2.5), en las paredes del molde hay mayor velocidad de enfriamiento que hacia el núcleo y, además, el metal se adhiere al molde lo que favorece la formación de núcleos de cristalización, con lo que se forma gran cantidad de granos cristalinos. En cambio, a una cierta distancia de la pared del molde la velocidad es más lenta y hay menos núcleos de cristalización, por lo que los granos son mayores; se forman como columnas en dirección perpendicular a la pared.

Cristalización de los metales puros y de las aleaciones

2. También, durante el enfriamiento, el metal se contrae, con lo que pueden aparecer defectos, como los rechupes y las sopladuras, originados por la falta de metal líquido en la superficie libre del molde o en el interior, respectivamente (Fig. 2.6).

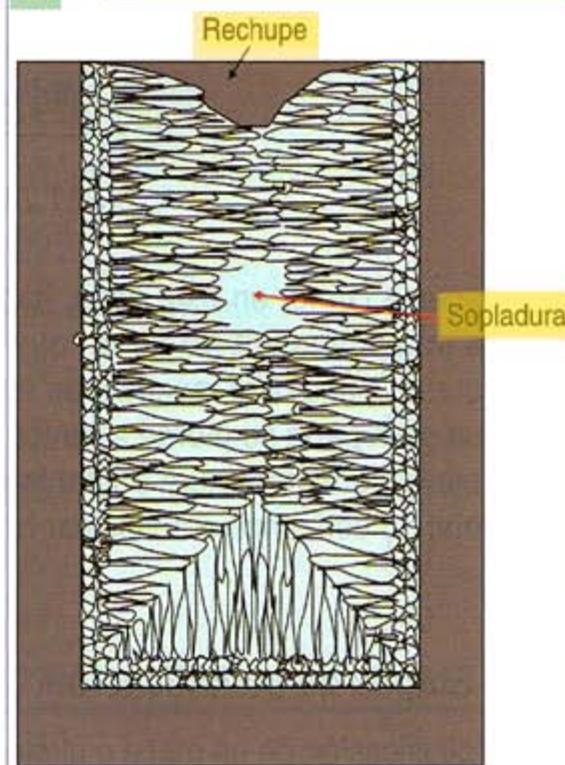
1.

Fig. 2.5. Solidificación en molde.



2.

Fig. 2.6. Defectos en la solidificación.



Regla de las fases de Gibbs

1 Cada una de las sustancias o elementos químicos que forman un sistema material se denomina **componente**. A modo de ejemplo, el acero está formado por una aleación de dos componentes, hierro (Fe) y carburo de hierro (Fe_3C).

2 A cada una de las partes homogéneas de un sistema que se diferencia físicamente del resto, se le llama **fase**. En los elementos puros «fase» es sinónimo de «estados». Por ejemplo, dentro del sistema agua pueden existir tres fases: la sólida (hielo), la fase líquida y la fase gaseosa (vapor de agua).

Las fases no tienen por qué estar formadas por elementos químicos puros, sino que pueden estar constituidas por compuestos químicos, aleaciones o disoluciones. El sistema material agua salada-hielo está formado por dos fases: una es la solución salina, formada a su vez por agua más NaCl; y otra, el hielo.

3 El número de variables que podemos modificar libremente (temperatura, presión, concentración, etc.), reciben el nombre de **grados de libertad**.

Josiah Willard Gibbs, en sus estudios termodinámicos, obtuvo una ecuación que permite calcular el número de fases que pueden coexistir en equilibrio dentro de un sistema material. Dicha fórmula, conocida como **regla de las fases de Gibbs**, se puede expresar como:

$$F + N = C + 2$$

Donde: F = Número de fases que pueden coexistir.

N = Grados de libertad o variables de estado (por ejemplo: presión, temperatura, concentración).

C = Número de componentes de un sistema material.

Recuerda

Para que dos elementos se disuelvan completamente se deben satisfacer cuatro reglas:

- La estructura cristalina de ambos elementos debe ser la misma.
- El tamaño de los átomos debe ser semejante.
- Los elementos no deben estar próximos en la tabla de electronegatividades (así no formaran compuestos).
- Los elementos deben tener la misma valencia.

A modo de ejemplo vamos a aplicar la regla de Gibbs al diagrama de fases regulado por las variables presión-temperatura ($P-T$) del agua pura (Fig. 2.7).

1. Estudiaremos qué ocurre en el punto triple del diagrama y sacaremos las siguientes consecuencias:

- Coexisten **tres fases** en equilibrio: sólido, líquido y vapor.
- El número de componentes es **uno**: el agua.

Se puede calcular el número de grados de libertad, aplicando la regla de las fases:

$$F + N = C + 2 \Rightarrow 3 + N = 1 + 2 \Rightarrow N = 0 \text{ (cero grados de libertad)}$$

Consecuencia: ninguna de las variables ($P-T$) se puede modificar. Se dice que el punto triple es un **punto invariante**.

2. Nos fijamos ahora en la curva de solidificación sólido-líquido, y se observa que en cualquier punto, A, de esa curva coexisten dos estados o fases. Se aplica la regla de fases:

$$F + N = C + 2 \Rightarrow 2 + N = 1 + 2 \Rightarrow N = 1 \text{ (un grado de libertad)}$$

Consecuencia: una variable (T, P) puede cambiar manteniendo un sistema donde coexisten dos fases. A una presión determinada, sólo existe una temperatura en que las dos fases sólido-líquido coexisten.

3. Consideremos, por último, un punto cualquiera, B, dentro de una fase única. Se tiene que el número de fases es uno, y aplicando la regla de fases:

$$F + N = C + 2 \Rightarrow 1 + N = 1 + 2 \Rightarrow N = 2 \text{ (dos grados de libertad)}$$

Consecuencia: se pueden modificar dos variables (P y T), y el sistema permanecerá en una única fase.

Regla de las fases de Gibbs

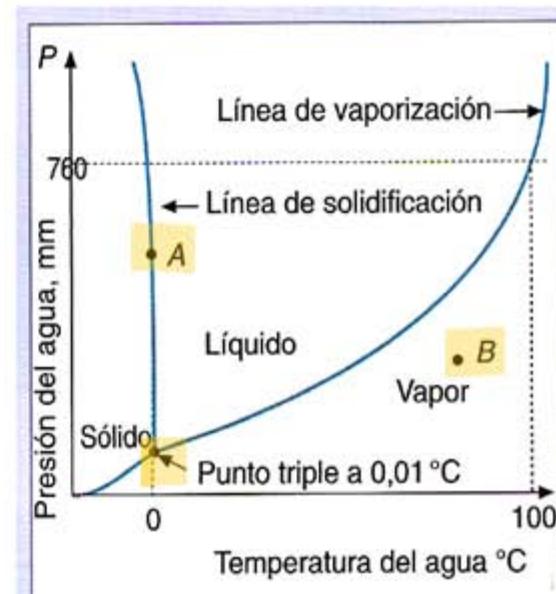


Fig. 2.7. Diagrama de equilibrio $P-T$ para el agua pura.

Regla de las fases de Gibbs

Esta regla nos define los grados de libertad que posee el sistema dependiendo del tipo de variables que consideremos. Establece la siguiente relación:

$$F = C - P + 2$$

donde F = número de grados de libertad

C = número de componentes

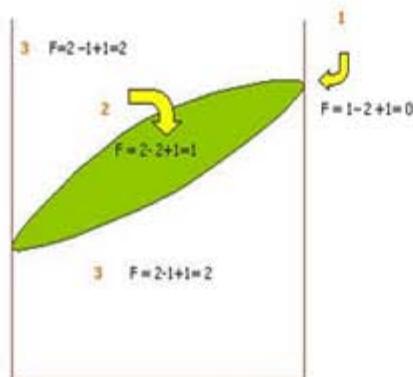
P = número de fases presentes

2 = es el número de variables de estado del sistema (temperatura y presión)

En los casos experimentales que nosotros trataremos, el efecto de la variación de la presión es despreciable, así establecemos que: $P = 1 \text{ atm} = \text{constante}$ durante todo el experimento. Así pues, la regla de las fases queda establecida para nuestros propósitos empíricos como:

$$F = C - P + 1$$

Veamos con un ejemplo la gran utilidad de esta ecuación:



Diagramas de equilibrio de fases. Regla de la palanca

Toda la información sobre la estructura de fases de una aleación determinada se encuentra presente en los llamados **diagramas de fases, de equilibrio o constitucionales**. A partir de las transformaciones de fases y de los cambios que ocurren entre fases al modificar la temperatura (subenfriamiento), se originan la mayoría de las microestructuras, lo que implica la transformación de una fase a otra, o la aparición o desaparición de ésta. La utilidad de los diagramas de fase consiste en la posibilidad de predecir las transformaciones y las microestructuras resultantes de los cambios de fase, que pueden estar o no en equilibrio.

Los diagramas de equilibrio de fases representan la relación entre la estructura, la composición y el número de fases presentes en el equilibrio, así como las transformaciones que se producen desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente. Existen diferentes diagramas, pero la temperatura, la presión y la composición son los parámetros variables principales de las aleaciones binarias (dos componentes). Pueden existir más de dos componentes, y, en consecuencia, los diagramas se complican y su representación es más difícil. No obstante, como la presión suele ser la atmosférica, solamente quedan dos variables: la temperatura y la composición.

Diagramas de equilibrio de fases. Regla de la palanca

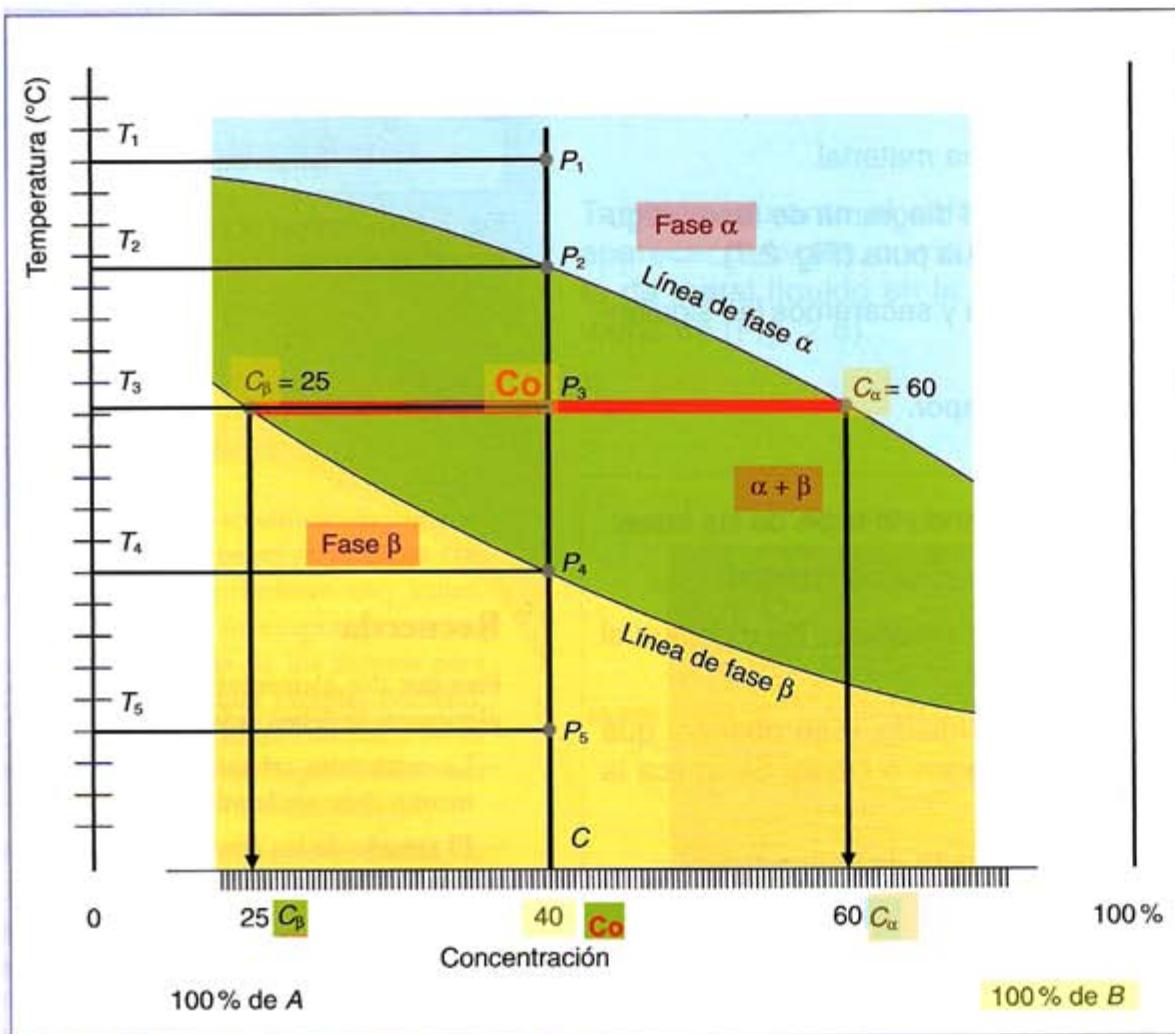


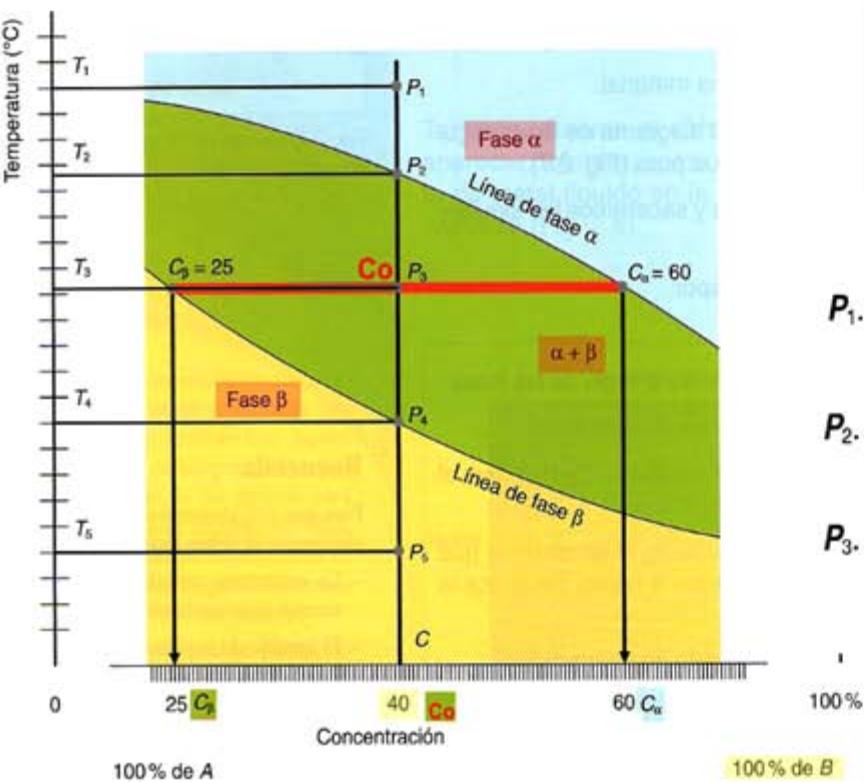
Fig. 2.8. Ejemplo de diagrama de fases.
Deducción de la regla de la palanca.

En los diagramas, generalmente, a las diferentes fases se les denomina con **letras griegas** (excepto al material fundido, que simplemente se le llama «líquido»).

Con el uso de estos diagramas se puede determinar la **composición o porcentaje de cada fase** para una concentración y temperatura determinadas de los materiales que entran en la aleación (Fig. 2.8). La figura representa una aleación binaria, a la izquierda se ha puesto un elemento *A* y a la derecha un elemento *B*. Desde *A* a *B* vamos de una concentración del 0 % de *B* al 100 % de *B*, en cambio de *B* a *A* iremos de una concentración del 0 % de *A* al 100 % de *A*.

Analicemos la Fig. 2.8 para una concentración dada, por ejemplo 40 % de *B*, línea vertical larga. En esta figura se presenta un diagrama con dos fases, α y β . Al disminuir la temperatura, la fase α va paulatinamente convirtiéndose en la β , pero hasta

que esto sucede pueden convivir las dos fases en el seno de la aleación.



Diagramas de equilibrio de fases. Regla de la palanca

Estudiemos una serie de puntos:

- P₁. En esta zona solamente hay **fase α**, así será hasta bajar a la línea que se denomina *línea de fase α*. El 100 % de la aleación se encuentra en fase α.
- P₂. Es un punto sobre la *línea de fase α*, a partir de aquí comenzará a aparecer la fase **β**.
- P₃. Este punto es el más interesante del estudio, pues en esa zona conviven las fases **α** y **β**, con lo que se debe averiguar el porcentaje de cada una. Para ello se aplica la denominada **regla de la palanca**.
- P₄. Es un punto sobre la *línea de fase β*, desaparece la fase α y a partir de aquí comenzará a estar solamente la fase **β**.
- P₅. Ahora se está como al principio, pero con el 100 % de **fase β**.

Seguidamente se aplica lo visto a una serie de aleaciones de dos componentes, como son:

P_3 .

Este punto es el más interesante del estudio, pues en esa zona conviven las fases α y β , con lo que se debe averiguar el porcentaje de cada una. Para ello se aplica la denominada **regla de la palanca**.

- En la temperatura T_3 , correspondiente al punto de estudio, se traza un segmento horizontal (isoterma) que corta en los puntos C_α y C_β en las líneas de fase α y de fase β . A cada uno de estos puntos les corresponde una concentración, en el ejemplo que seguimos son 60 % y 25 % las concentraciones de B en la aleación.
- La fracción de una fase, por ejemplo α , se calcula midiendo la longitud del segmento de la isoterma (también denominada recta de reparto), desde la concentración de la aleación C_0 (P_3) hasta el límite de la otra fase, en este caso la β , y dividiéndola por la longitud total del segmento de isoterma.

Así:

$$\text{Fracción de } \alpha = \frac{P_3 C_\beta}{C_\alpha C_\beta} = \frac{40 - 25}{60 - 25} = \frac{15}{35} = 0,4286$$

$$\text{Frac } \alpha = \frac{C_0 - C_\beta}{C_\alpha - C_\beta}$$

Luego de fase α se tiene un 42,86 % en la aleación que se encuentra en las condiciones del punto P_3 , es decir, con una concentración del 40 % de B y a temperatura T_3 .

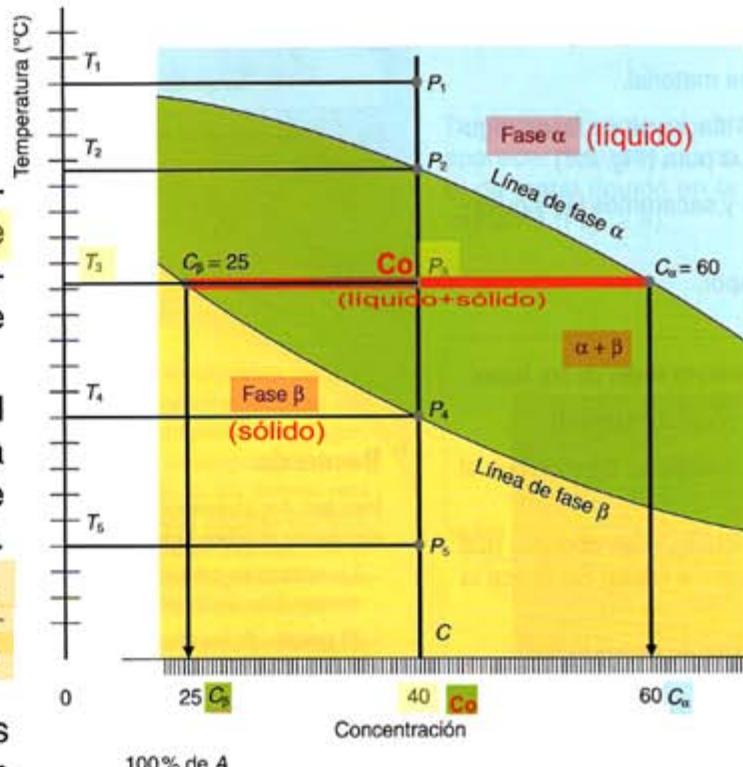
Para la otra fase se procede de la misma forma:

$$\text{Fracción de } \beta = \frac{P_3 C_\alpha}{C_\alpha C_\beta} = \frac{60 - 40}{60 - 25} = \frac{20}{35} = 0,5714$$

$$\text{Frac } \beta = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_\beta}$$

Luego de fase β se tiene un 57,14 % en la aleación que se encuentra en las condiciones del punto P_3 , es decir con una concentración del 40 % de B y a temperatura T_3 .

Obsérvese que para pasar de fracción (o tanto por uno) a porcentaje (o tanto por cien) simplemente se multiplica por 100.



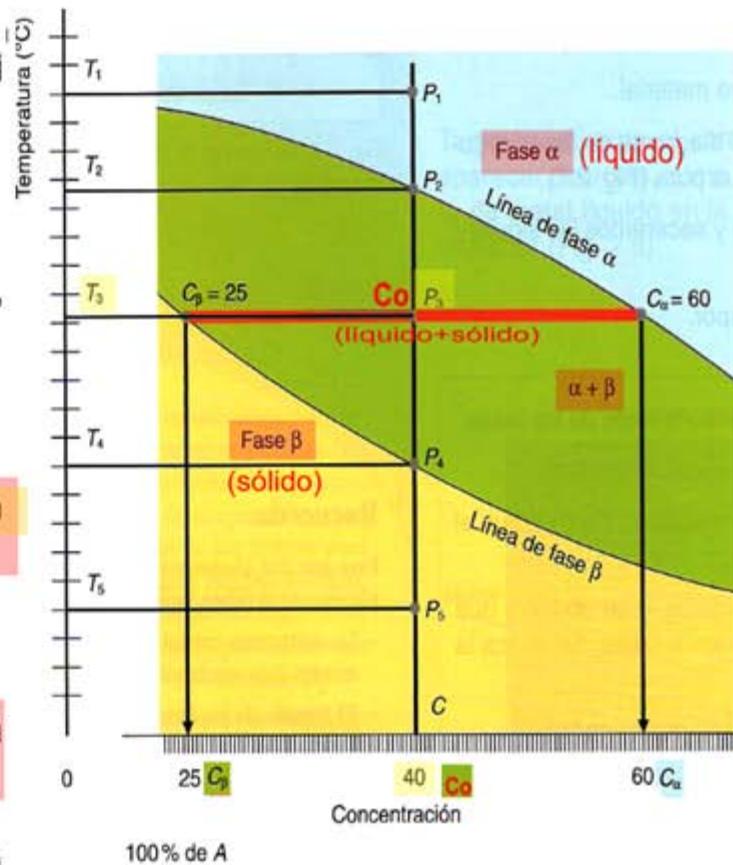
Diagramas de equilibrio de fases. Regla de la palanca

P₄. Es un punto sobre la línea de fase β , desaparece la fase α y a partir de aquí comenzará a estar solamente la fase β . (sólida)

P₅. Ahora se está como al principio, pero con el 100 % de fase β .

Seguidamente se aplica lo visto a una serie de aleaciones de dos componentes, como son:

- Aleaciones totalmente solubles en estado líquido y sólido.
- Aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.
- Aplicación a la aleación Fe-C (Acero).
- Aleaciones con transformaciones en estado sólido (se aplicará al caso de la aleación Fe-C).
- Por último, se estudiará en particular el diagrama Fe-C de forma semejante a como se ha realizado en este ejemplo.



**Diagramas de equilibrio de fases.
Regla de la palanca**

Diagramas de equilibrio de fases. Regla de la palanca

22

Regla de la palanca. Demostración:

La masa total de aleación es la misma sumando las masas de cada fase que sumando las masas de cada elemento:

$$m = m_\alpha + m_\beta$$

$$m = m_A + m_B$$

La cantidad de B que hay en cada fase se obtiene multiplicando la masa de cada fase por la concentración correspondiente leída sobre la intersección de la isotermia con la línea de fase correspondiente. Así:

Cantidad de B en la fase α :

$$m_{B,\alpha} = \frac{m_\alpha C_\alpha}{100}$$

Cantidad de B en la fase β :

$$m_{B,\beta} = \frac{m_\beta C_\beta}{100}$$

Cantidad de B total:

$$m_B = \frac{m C}{100} = \frac{m_\alpha C_\alpha}{100} + \frac{m_\beta C_\beta}{100},$$

o lo que es igual $m C = m_\alpha C_\alpha + m_\beta C_\beta$, sustituyendo m por la suma de cantidades de fase

$$(m_\alpha + m_\beta) C = m_\alpha C_\alpha + m_\beta C_\beta$$

$$m_\beta (C - C_\beta) = m_\alpha (C_\alpha - C)$$

$$\frac{m_\beta}{m_\alpha} = \frac{C_\alpha - C}{C - C_\beta} = \frac{\overline{P_3 C_\alpha}}{\overline{P_3 C_\beta}}$$

Es decir, las concentraciones de cada fase son inversamente proporcionales a la longitud de los segmentos que interseccionan la isotermia con cada línea de fase y la concentración a estudio.

Como $m_\alpha = m - m_\beta$, sustituyendo en la anterior proporción:

$$(m - m_\beta + m_\beta) C = (m - m_\beta) C_\alpha + m_\beta C_\beta$$

$$m C = m (C_\alpha - m_\beta C_\alpha + m_\beta C_\beta)$$

$$m_\beta (C_\alpha - C_\beta) = m (C_\alpha - C) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{m_\beta}{m} = \frac{C_\alpha - C}{C_\alpha - C_\beta} = \frac{\overline{P_3 C_\alpha}}{\overline{C_\beta C_\alpha}}$$

Es decir, la proporción de una fase respecto de la masa total es el cociente entre el segmento contrario y el segmento total sobre la isotermia. (Regla parecida a la de la palanca pero inversa.) Obsérvese que si se multiplica por 100 se obtiene el porcentaje.

Diagramas isomórficos binarios. Solubilidad total en estado líquido y sólido

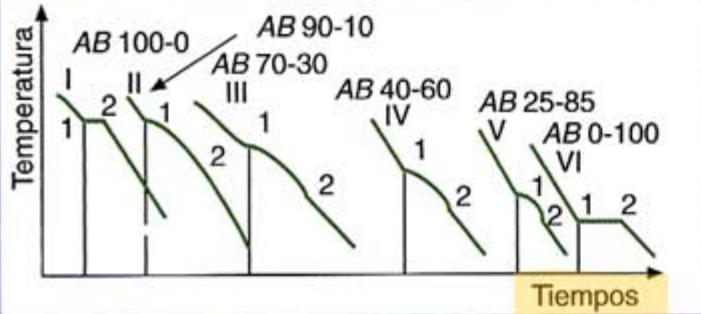


Fig. 2.9. Diagrama de enfriamiento.

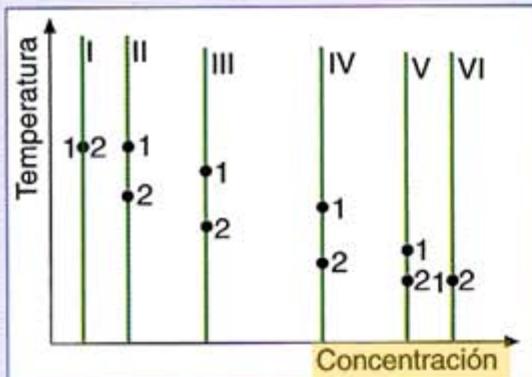


Fig. 2.10. Diagrama de temperatura-concentración.

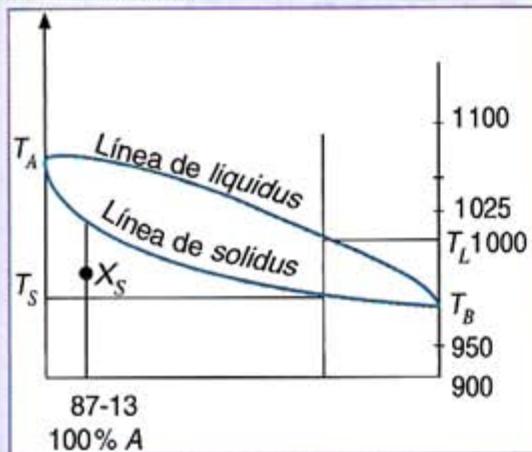


Fig. 2.11. Diagrama de equilibrio de la aleación A-B.

En una aleación, al enfriar el líquido se va formando sólido. A continuación, antes de que todo esté solidificado, coexistirán las fases líquida y sólida. Seguidamente veremos cómo se obtiene el diagrama de fases estudiando el enfriamiento de diferentes concentraciones de aleación.

Se considera una aleación binaria de componentes *A* y *B* que son totalmente solubles en estado líquido y sólido, por lo que se denomina al sistema resultante **isomorfo**.

En primer lugar, se confecciona el **diagrama de equilibrio de enfriamiento** (Fig. 2.9), procediendo de la siguiente forma:

1. Se toma un número de aleaciones con distintos porcentajes de *A* y *B*.
2. Se funden y se dejan enfriar lentamente; se toman los datos tiempo-temperatura, registrando en un gráfico los puntos críticos de cada una de las aleaciones. Los puntos (1) de cada curva representan el comienzo de la formación de cristales, y los puntos (2) representan la formación del último cristal.
3. Se trasladan estos puntos críticos a una **gráfica temperatura-concentración** (Fig. 2.10), colocándolos en la perpendicular correspondiente de isoconcentración (puntos de igual concentración).
4. Se unen con una línea todos los puntos (1), y de la misma forma los puntos (2), obteniendo el **diagrama de la Figura 2.11**, que representa el **diagrama de equilibrio de la aleación A-B**.

Diagramas isomórficos binarios. Solubilidad total en estado líquido y sólido

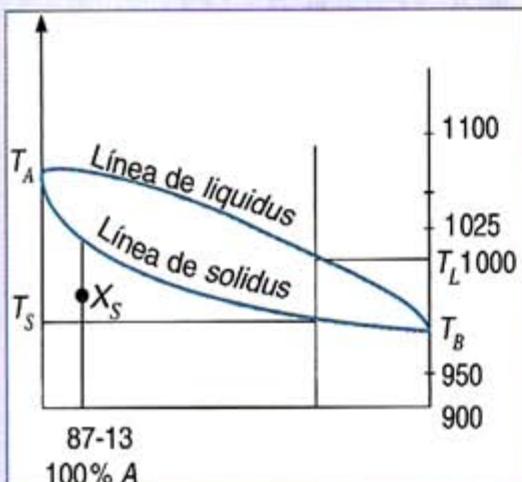


Fig. 2.11. Diagrama de equilibrio de la aleación A-B.

La línea que une los puntos (1), donde comienzan a formarse los cristales, es la línea que separa la fase líquida del resto del diagrama, que se denomina **línea de liquidus**. Por encima de esta línea todas las aleaciones estarán en estado líquido. Fig. 2.11.

La línea que une todos los puntos (2) representa la **línea de solidus**. Por debajo de ella todas las aleaciones se encuentran en estado sólido. Fig. 2.11.

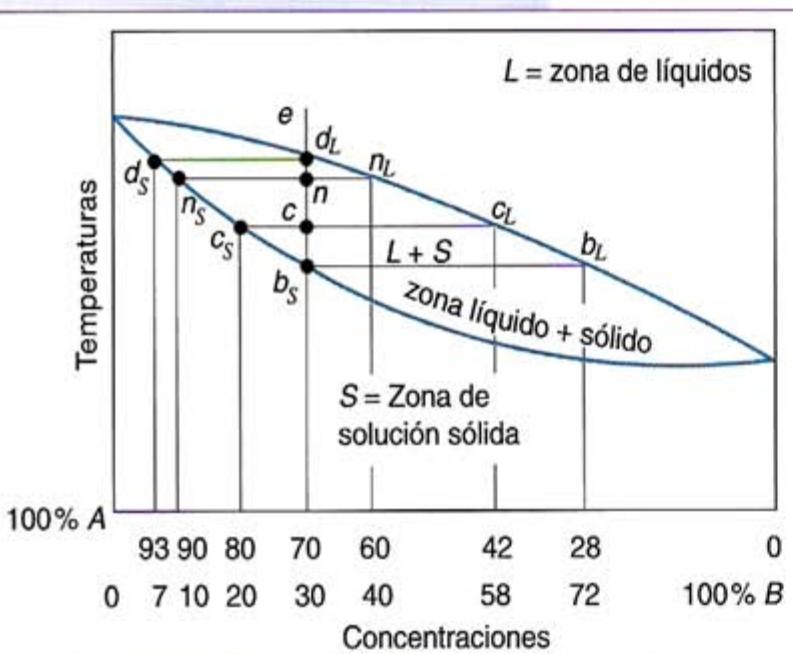


Fig. 2.12. Zonas de un diagrama de equilibrio de la aleación A-B.

Se puede determinar la temperatura a la que comienza a fundirse la aleación, y aquella donde estará totalmente fundida, para una concentración determinada. Para ello, se traza una línea vertical por el punto que representa la concentración que interesa en este caso (línea *m-n* de la Figura 2.12); de tal forma que los puntos donde intersecta con las líneas *solidus* y *liquidus*, muestran, en el eje de temperaturas, los valores que determinar: T_s (temperatura de solidificación) y T_L (temperatura de licuefacción).

Las líneas de *solidus* y *liquidus* dividen el diagrama en tres **zonas o campos**; dentro de cada uno de ellos, toda la aleación está formada por las mismas fases. En cada punto de una determinada zona, cada fase está perfectamente definida (Fig. 2.12).

Diagramas isomórficos binarios. Solubilidad total en estado líquido y sólido

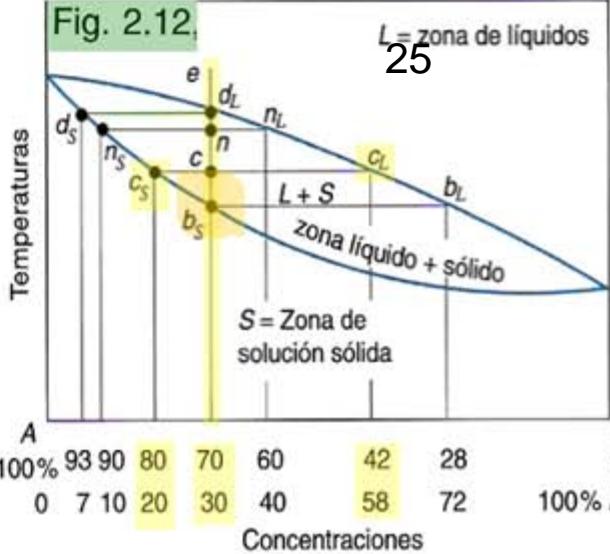
Cualquier punto de la **zona L** representa una fase líquida única, homogénea concentración, la de la aleación correspondiente, y más o menos fluida, seg esté más o menos aleiada de la línea de *liquidus*.

En la **zona S** también existe una sola fase, la sólida, de concentración igual a la de la aleación correspondiente.

En la zona comprendida entre las líneas de *liquidus* y *solidus* hay dos fases, líquida y sólida, donde la concentración depende de la temperatura. Se puede analizar lo que sucede con una aleación de 70 % de A y 30 % de B en la Fig. 2.12, para ello:

1. Se traza una perpendicular a-e por la concentración A-B 70-30.
2. Por debajo de b_s todo está en fase sólida, con concentración A-B 70-30. Por encima de d_L todo se encuentra en fase líquida y con igual concentración A-B 70-30.
3. Entre b_s y d_L , a medida que aumenta la temperatura, va aumentando la fase líquida y disminuyendo la sólida. La concentración del componente de menor punto de fusión se va empobreciendo. Por el contrario, se va enriqueciendo la del componente de mayor punto de fusión.

Las concentraciones de cada fase para el punto c (Fig. 2.12) son las que determinan el trazado de la recta de reparto, al cortar las líneas de *solidus* y *liquidus*, respectivamente: C_L representa la concentración del líquido, que es el 42 % de A y 58 % de B. C_s la concentración del sólido, y es 80 % de A y 20 % de B.



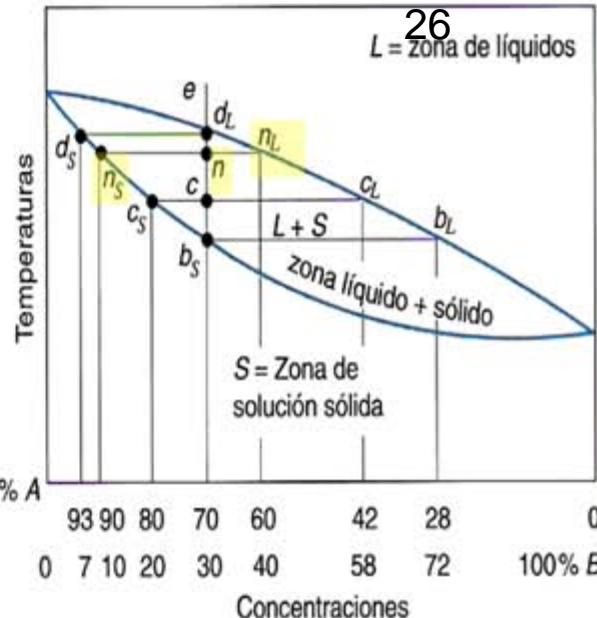
- **Sistema isomorfo.** Diagrama de fases en el cual sólo existe una única fase sólida.
- **Liquidus.** Temperatura a la cual el líquido empieza a solidificarse en condiciones de equilibrio.
- **Solidus.** Temperatura durante la solidificación de una aleación en la que al final solidifica la fase líquida.

Diagramas isomórficos binarios. Solubilidad total en estado líquido y sólido

La cantidad relativa de cada fase (w_L y w_S) se calcula aplicando la ley de la palanca, donde los segmentos CC_L y $C_S C$ se consideran brazos de las respectivas fases L y S :

$$w_L = \frac{\overline{C_S C}}{\overline{C_S C_L}} \cdot 100 = \frac{80 - 70}{80 - 42} \cdot 100 = 26,32\%$$

$$w_S = \frac{\overline{C C_L}}{\overline{C_S C_L}} \cdot 100 = \frac{70 - 42}{80 - 42} \cdot 100 = 73,68\%$$



Para otro punto cualquiera n de la misma aleación, también se obtendrá de la misma manera: la fase líquida $n_L = 40\%$ de B y 60% de A , y para la fase sólida $n_S = 10\%$ de B y 90% de A . A continuación, se calculan las cantidades relativas:

$$w_L = \frac{\overline{n_S n}}{\overline{n_S n_L}} \cdot 100 = \frac{90 - 70}{90 - 60} \cdot 100 = 66,7\%$$

$$w_S = \frac{\overline{n n_L}}{\overline{n_S n_L}} \cdot 100 = \frac{70 - 60}{90 - 60} \cdot 100 = 33,3\%$$

Sabías que...

Las propiedades mecánicas de las aleaciones isomórficas dependen solamente de la composición cuando otras variables, como el tamaño de grano, son constantes. Así, al adicionar Ni al Cu la resistencia a la tracción aumenta desde la del cobre, 45 kp/mm^2 , hasta llegar a un máximo (60% Ni, 85 kp/mm^2) y luego vuelve a disminuir hasta la del níquel, 70 kp/mm^2 .

Se puede comprobar que también se cumple para los puntos b_S y d_L .

Aplicación a la aleación Cu²⁷-Ni

Descripción

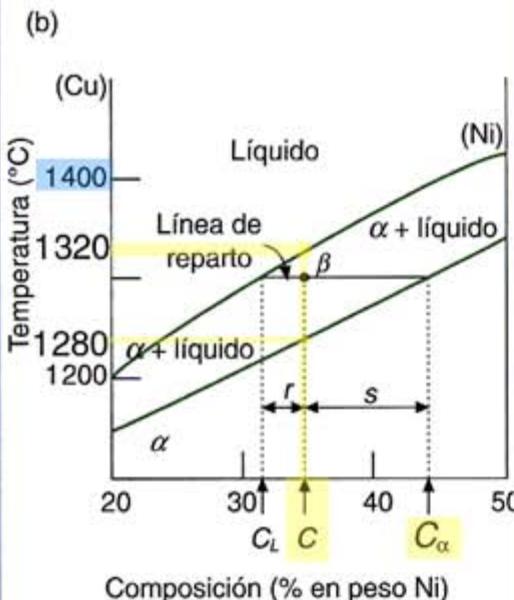
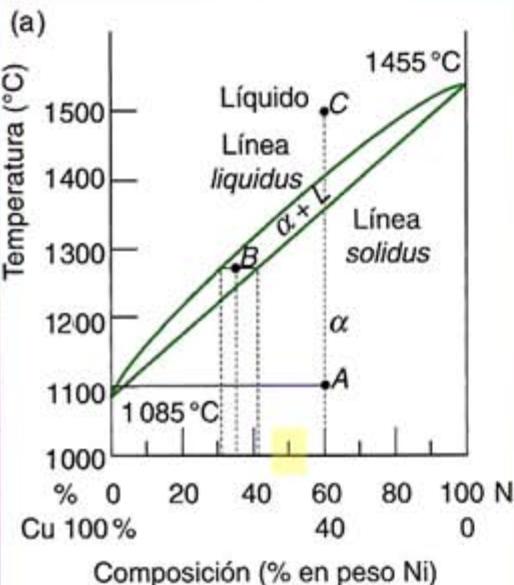


Fig. 2.13. a) Diagrama de fases CuNi; b) ampliación de un punto del campo ($\alpha + L$).

El diagrama binario Cu-Ni (véase Fig. 2.13) es el sistema más clásico por su fácil comprensión e interpretación. Como en el ejemplo anterior, 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 % Cu) en el derecho. En el diagrama podemos observar tres campos delimitados por dos 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.

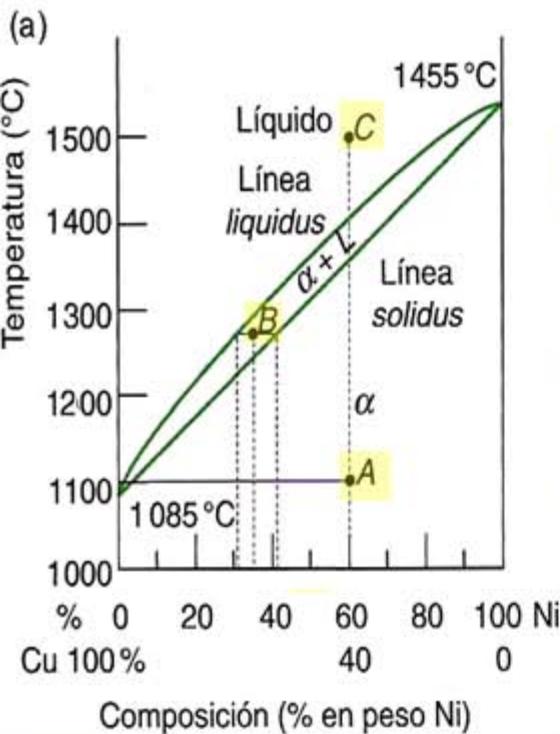
El líquido L es una solución homogénea compuesta por Cu y Ni. La fase α es una solución sólida por sustitución, de átomos de Cu y de Ni, de estructura FCC. A temperaturas inferiores a 1080 °C el Cu y el Ni son mutuamente solubles en estado sólido a cualquier composición, ya que el Cu y el Ni tienen la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

Las líneas de *solidus* y *liquidus* intersecciónan 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 % en peso de Ni y 50 por 100 de Cu, ésta 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.

Aplicación a la aleación Cu-Ni

Interpretación general del diagrama de fases Cu-Ni



Conociendo la concentración y la temperatura de equilibrio, los sistemas binarios nos suministran la información siguiente: **1** número de fases presentes en el equilibrio **2** composición de cada fase y **3** la fracción o porcentaje de cada fase.

Lo visto hasta ahora lo vamos aplicar al diagrama de fases Cu-Ni (Fig. 2.13).

Número de fases presentes

En este caso se procede al revés, en lugar de ir disminuyendo la temperatura se aumenta.

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 . El punto **C** se encuentra en la zona de líquido, le sucede como al punto A, el 60 % es Ni líquido y el 40 % Cu líquido.

Fig. 2.13. a) Diagrama de fases CuNi; b)

aleación Cu-Ni

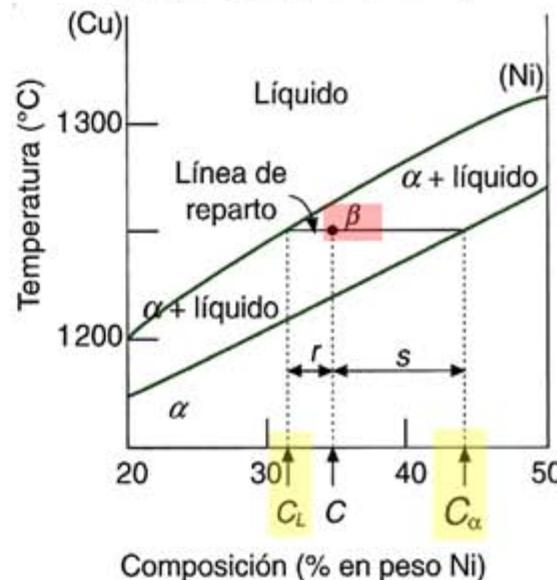
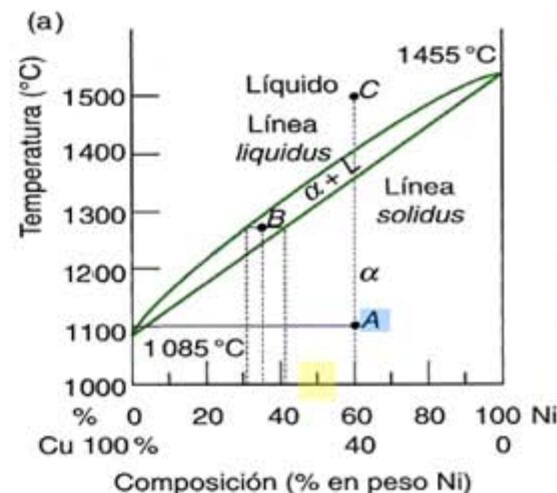
■ Determinación de la composición de las fases

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 (Fig. 2.13a), aleación de 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 y se procederá como se ha estudiado. Se traza imaginariamente líneas horizontales a una temperatura determinada, denominadas **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 Fig. 2.13b, que se encuentra dentro de la región $\alpha + L$. Se traza la recta de reparto, tal como se indica en la figura. 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 da la composición en la fase sólida C_α , que corresponde a 43 % en peso de Ni y 57 % en peso de Cu.



Aplicación a la aleación Cu-Ni

Interpretación general del diagrama de fases Cu-Ni

Determinación de los porcentajes de cada fase

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.

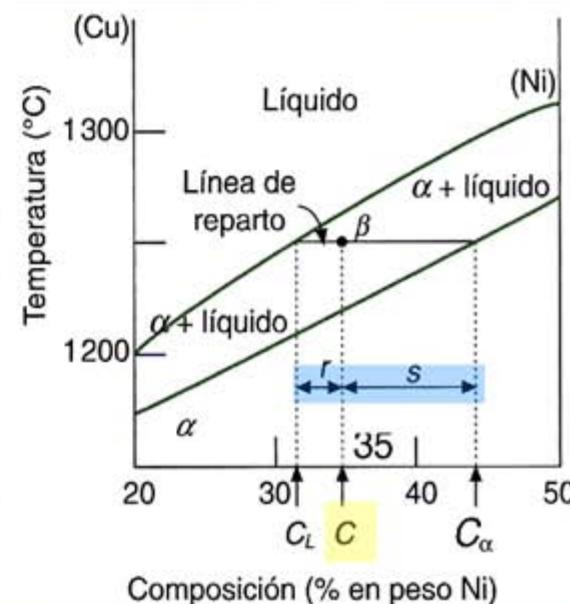
La solución es obvia para la región monofásica, ya que sólo existe una fase. El porcentaje es del 100 %. Refiriéndonos al punto A de la Fig. 2.13a, en la aleación de 60 % en peso de Ni y 40 % en peso de Cu a 1100 °C, sólo existe la fase α y la aleación es 100 % de α .

Si el punto composición-temperatura está localizado dentro de la región bifásica, el problema se complica un poco, pero se puede resolver con la regla de la palanca.

Fijándonos de nuevo en el punto B (Fig. 2.13), la aleación Cu-Ni tiene una composición 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, al que corresponden unas fracciones de masa de las fases w_L y w_α , que se calculan aplicando la regla de la palanca:

$$w_L = \frac{s}{r+s} \cdot 100 \quad y \quad w_\alpha = \frac{r}{r+s} \cdot 100$$



Recuerda

Los diagramas de fases no sólo existen en los sistemas metal-metal, sino que se han obtenido experimentalmente diagramas de fases muy útiles para diseñar y fabricar materiales cerámicos.

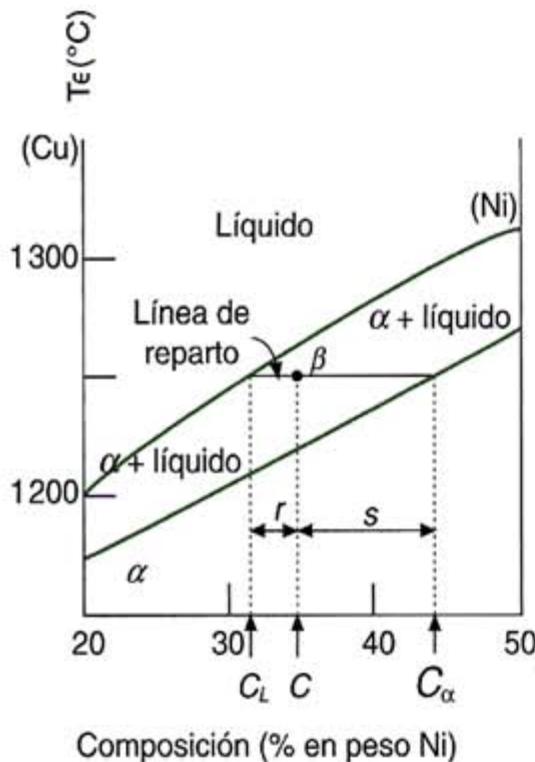
También se pueden obtener diagramas de fases para sistemas metálicos o cerámicos con más de dos componentes, aunque su interpretación es bastante compleja. Por ejemplo, un diagrama de fases ternario (tricomponente) se debe representar en tres dimensiones.

Interpretación general del diagrama de fases Cu-Ni

Aplicación

a la

aleación Cu-Ni



Determinación de los porcentajes de cada fase

Se puede obtener w_L restando las composiciones como:

$$w_L = \frac{s}{r+s}$$

$$w_L = \frac{C_\alpha - C}{C_\alpha - C_L}$$

Donde $C_\alpha = 43\%$ en peso de Ni; $C = 35\%$ en peso de Ni; y $C_L = 32\%$ en peso de Ni.

Sustituyendo se obtiene: $w_L = \frac{43 - 35}{43 - 32} = 0,73$

De igual modo, se calcula la fase α : $w_\alpha = \frac{r}{r+s} = \frac{C - C_L}{C_\alpha - C_L} = \frac{35 - 32}{43 - 32} = 0,27$

Resumiendo, si se conocen la temperatura y la composición y si 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 se debe utilizar la recta de reparto, cuyos extremos determinan las composiciones de las respectivas fases. Respecto a las cantidades relativas de fases, la fase equivale a la aleación (en una aleación monofásica). En una bifásica se debe utilizar la regla de la palanca, calculando la relación de las longitudes de los segmentos de la recta de reparto.

Diagramas de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido

Figura 2.15.

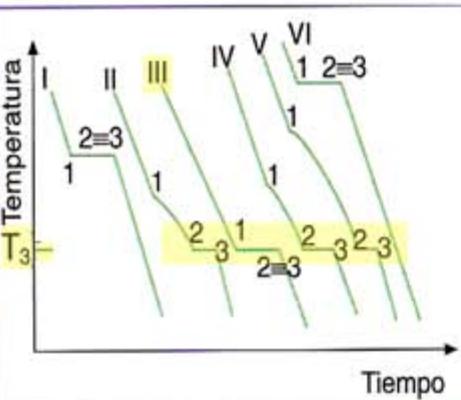
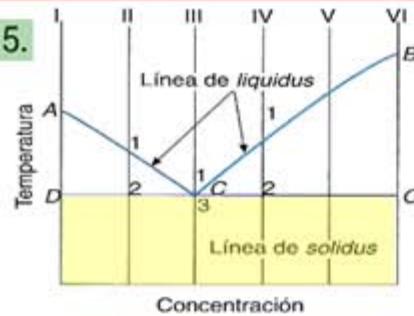


Fig. 2.14. Curvas de enfriamiento de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.

Se toma un número determinado de aleaciones con diferentes porcentajes de sus componentes A-B. Se representan sus curvas de enfriamiento en un diagrama temperatura-tiempo (Fig. 2.14).

Las curvas I y VI corresponden a los elementos puros. En ellas la temperatura permanece constante mientras dura la solidificación. De la observación del diagrama se puede deducir que en todas las aleaciones A-B, sea cual sea su concentración, la temperatura a la que acaban de solidificar es la misma (T_3). Más adelante se verá la importancia de este fenómeno.

Llevando estos datos a un diagrama de temperatura-concentración, y uniendo los puntos de características iguales, resulta el diagrama de equilibrio de la Figura 2.15.

La línea que une los puntos donde empieza la formación de los primeros cristales es la **línea de liquidus** (uniendo los puntos 1 de la Fig 2.14). Por encima de ella, todas las aleaciones se encuentran en estado líquido. La línea que une todos los puntos donde terminan de formarse los cristales es la **línea de solidus**, y por debajo de ella las aleaciones están en estado sólido (uniendo los puntos 3 de la Figura 2.14).

De la lectura e interpretación de estos diagramas, se pueden saber los puntos de fusión y solidificación de cualquier aleación; determinar la composición de una aleación para que funda a una temperatura fija; y lo más importante, saber cuál es la **aleación de punto de fusión más bajo, llamada eutéctica**. En la Figura 2.15 corresponde a la aleación III.

Las líneas de *solidus* y *liquidus* dividen el **diagrama en cuatro campos**. Dentro de cada uno de ellos toda aleación estará formada por las mismas fases (Fig. 2.16).

Cualquier punto de la **zona L** representa una sola fase, líquida y homogénea de concentración, de la aleación correspondiente, y más o menos fluida, según esté más o menos alejada de la línea de *liquidus*.

Diagramas de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido

En la zona *L + A* existen dos fases bien definidas: una de líquido y otra de cristales de aleación *A*. Veamos qué pasa con una aleación de menor contenido de *B* que la aleación eutéctica, por ejemplo, la que representa la línea *a-d*: **hipoeutécticas**,

- En el punto *a*, todo el líquido es de concentración *A-B* 70-30, que es la de la aleación.
- En el punto *b_L* comienzan a formarse los primeros núcleos cristalinos de *A*. La concentración de la fase líquida es de 70-30, y la correspondiente a los cristales, del punto *b_S*, es *A-B* 100-0.
- En el punto *n* se tienen cristales de concentración $n_S = A-B$ 100-0, y líquido de concentración $n_L = A-B$ 55-45. Las cantidades relativas de cada fase se obtienen aplicando la regla de la palanca, de la que resulta:

$$W_L = \frac{\overline{n_S n}}{\overline{n_S n_L}} = \frac{100 - 70}{100 - 55} \cdot 100 = 66,7\% \text{ de la fase líquida}$$

$$W_S = \frac{\overline{n n_L}}{\overline{n_S n_L}} = \frac{70 - 55}{100 - 55} \cdot 100 = 33,3\% \text{ de la fase sólida}$$

- En el punto *d* se tienen cristales de concentración $d_S = A-B$ 100-0, y el resto será líquido, cuya concentración es la del punto *c*; es decir, el de la aleación eutéctica $d_L = A-B$ 40-60.

$$W_L = \frac{\overline{d_S d}}{\overline{d_S c}} = \frac{100 - 70}{100 - 40} \cdot 100 = 50\% \text{ de la fase líquida}$$

$$W_S = \frac{\overline{dc}}{\overline{d_S c}} = \frac{70 - 40}{100 - 40} \cdot 100 = 50\% \text{ de la fase sólida}$$

- A partir del punto *d* hacia abajo, las aleaciones están formadas por los 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 serán el 30% del total de *B* y 70% de *A*, subdividido en 50% de *A* primario y $70 - 50 = 20$ de *A* secundario.

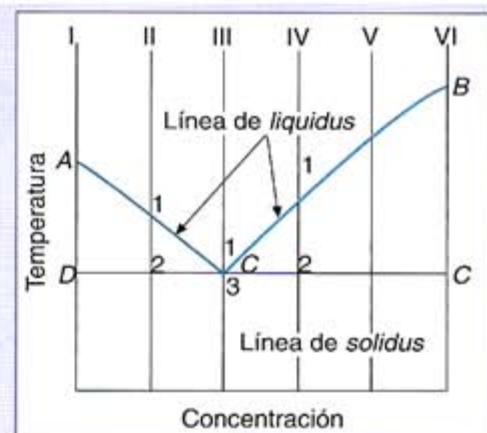


Fig. 2.15. Diagrama de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.

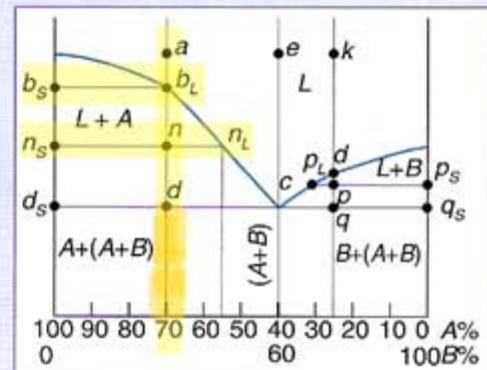


Fig. 2.16. Campos de un diagrama de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.

Diagramas de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido

f) En una aleación eutéctica resulta:

1. En un punto *e* dentro del campo *L*, la aleación se encuentra en estado líquido y los componentes totalmente disueltos; el porcentaje es el de la aleación 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, íntimamente mezclados, formando cristales mixtos de composición total eutéctica.
3. Por debajo de *c* y hasta la temperatura ambiente, no hay cambio alguno.

Las aleaciones eutécticas tienen la gran ventaja de fundir a la más baja temperatura posible de estas aleaciones; por tanto, son las idóneas para fabricar piezas fundidas, por llenar mejor los moldes y ser más homogéneas.

Recuerda

Las transformaciones de fases transcurren con o sin cambio de composición. Las que no alteran la composición se denominan transformaciones congruentes. Por el contrario, en una transformación incongruente se produce un cambio en la composición. Ejemplos de transformaciones congruentes son: las transformaciones alotrópicas y la fusión de materiales puros. Las reacciones eutéctica y eutectoide, así como la fusión de aleaciones isomórficas, son ejemplos de transformaciones incongruentes.

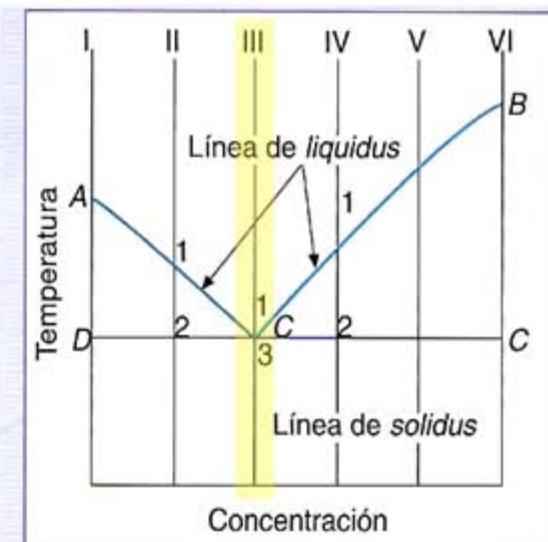


Fig. 2.15. Diagrama de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.

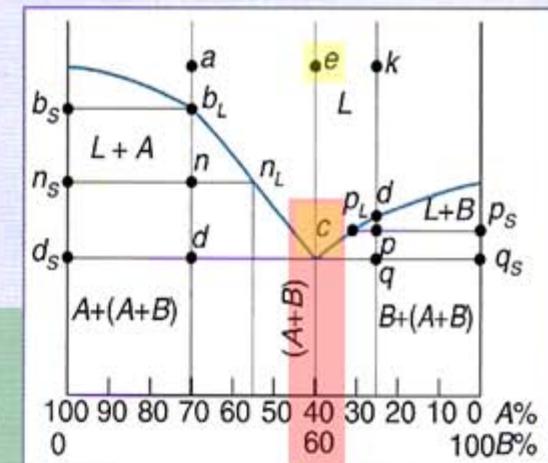
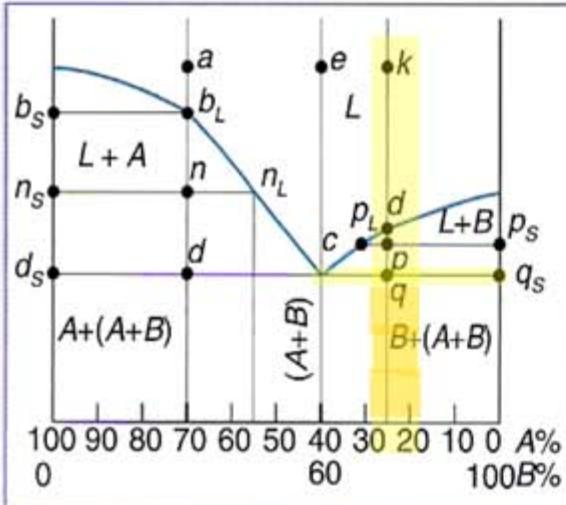


Fig. 2.16. Campos de un diagrama de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.

Diagramas de equilibrio de aleaciones totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido

- 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 cual tiene lugar la reacción eutéctica.
- Composición eutéctica.** Composición de la fase líquida que reacciona para formar dos nuevas fases sólidas a la temperatura eutéctica.
- Punto eutéctico.** Punto determinado por la composición eutéctica y la temperatura correspondiente.



g) Vamos a estudiar, por último, una aleación con mayor contenido de *B* que las eutéticas: **hipereutéticas**.

- En el punto *k* se tiene líquido homogéneo de concentración igual a la de la aleación.
- En *d* comienza la formación de fase sólida de cristales de componente *B*, en contacto con la fase líquida.
- En el punto *p* coexisten dos fases, la líquida y la sólida. La sólida está formada por cristales puros de *B*. La líquida, de aleación *A-B* con concentración $p_L = A-B\ 32,5-67,5$.

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

$$W_L = \frac{pp_S}{p_L p_S} = \frac{25}{32,5} \cdot 100 = 77\% \text{ fase líquida}$$

$$w_S = 100 - 77 = 23\% \text{ fase sólida, cristales } B$$

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

$$W_L = \frac{\overline{qq}_S}{c q_S} = \frac{25}{40} \cdot 100 = 62,5\% \text{ fase líquida}$$

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

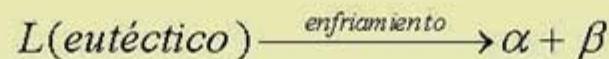
- Al llegar a este punto, en que la concentración de la fase líquida es la eutéctica, toda ella se transforma en fase sólida formada por cristales mixtos del elemento *A* y el *B*, de concentración la eutéctica. Así pues, en esta zona se hallan en equilibrio cristales de *B* libres y cristales mezclados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

Las aleaciones anteriores a la eutéctica se llaman **hipoeutéticas**, y las posteriores, **hipereutéticas**.

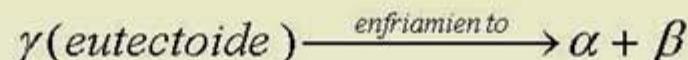
Tipos de Reacciones Invariantes

Tema 5-Diagrama
de fases

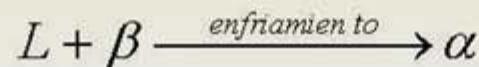
Reacción Eutéctica: transformación de un líquido L con la composición eutéctica en dos fases sólidas durante el enfriamiento



Reacción Eutectoide: transformación de un sólido γ con la composición eutectoide en dos fases sólidas durante el enfriamiento

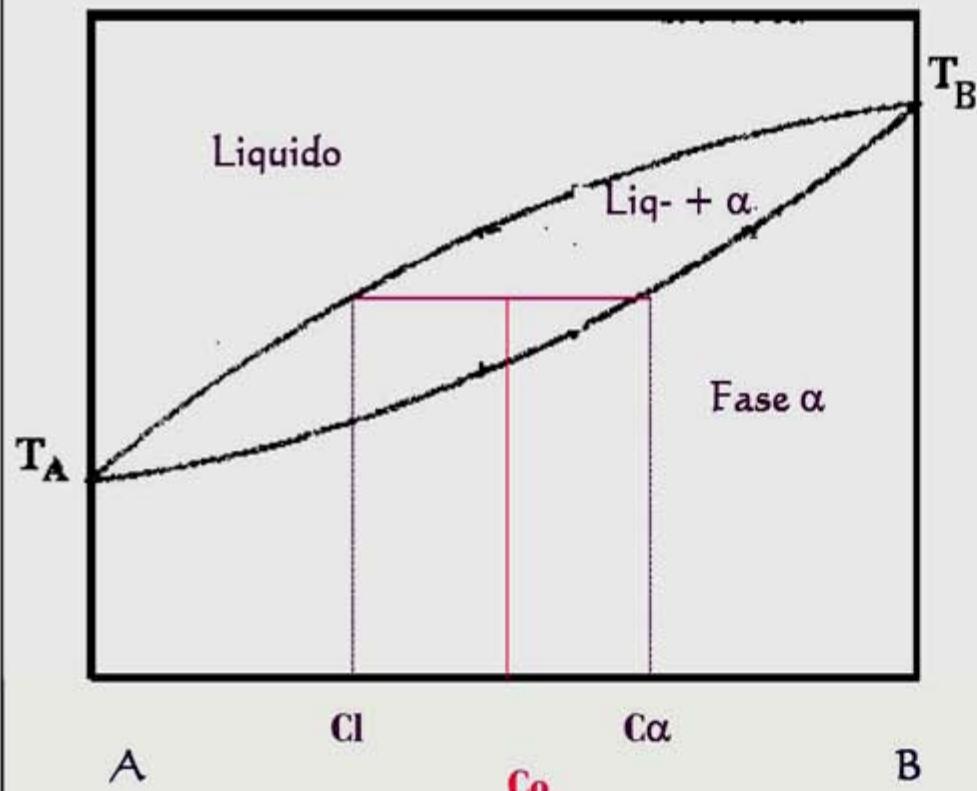


Reacción Peritéctica: transformación de un sólido β y un líquido en un sólido inicial α durante el enfriamiento



Regla de la Palanca: Fracción en peso

Tema 5. Diagrama de fases



En zonas bifásicas:

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_o}{C_\alpha - C_L}$$

$$W_\alpha = \frac{C_o - C_L}{C_\alpha - C_L}$$

Diagramas Binarios

Tema 5. Diagrama de fases

- Mezcla de 2 componentes (A y B)
- Dependiendo de la Solubilidad en estado sólido:
 - Sist. Binario con Solubilidad TOTAL: ⇒ Sistema Isomorfo (Regla de Hume-Rothery)
 - Sist. Binario con Solubilidad PARCIAL
 - Sist. Binario con Insolubilidad TOTAL
- Se representa P o T frente a composición

Diagramas Eutécticos

Fracción Molar: (0-1)

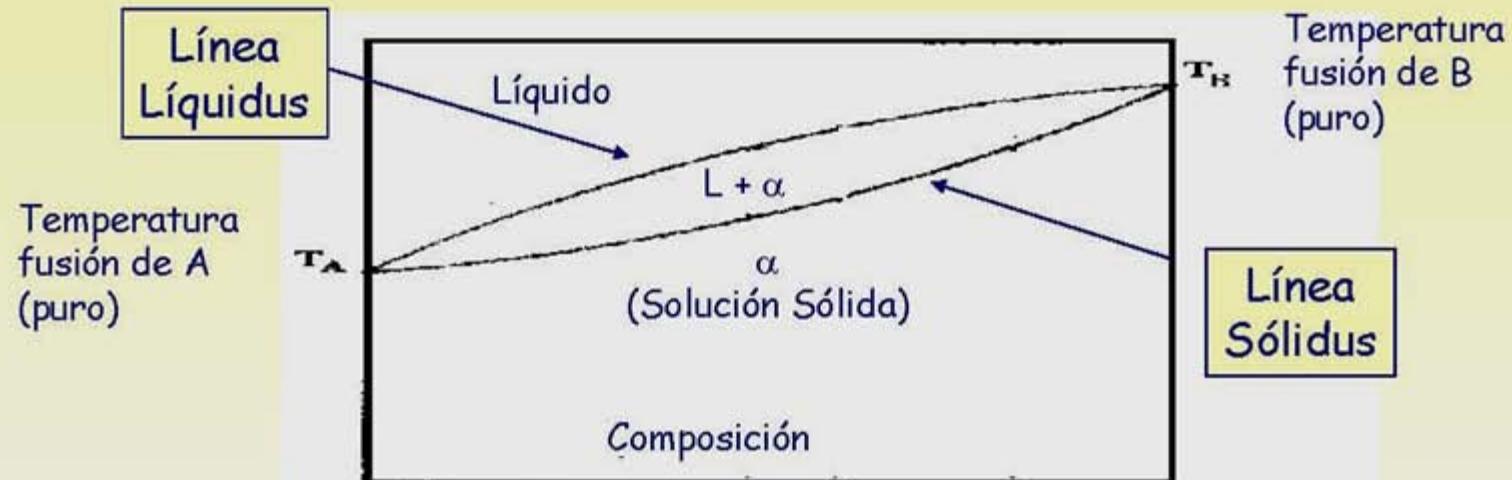
$$X_A = \frac{\text{moles}_A}{\text{moles}_A + \text{moles}_B}$$

Porcentaje en Peso: (0-100)

$$\% \text{ Wt (A)} = \frac{W_A}{W_A + W_B} \times 100$$

Solubilidad Total en Estado sólido

Tema 5. Diagrama de fases

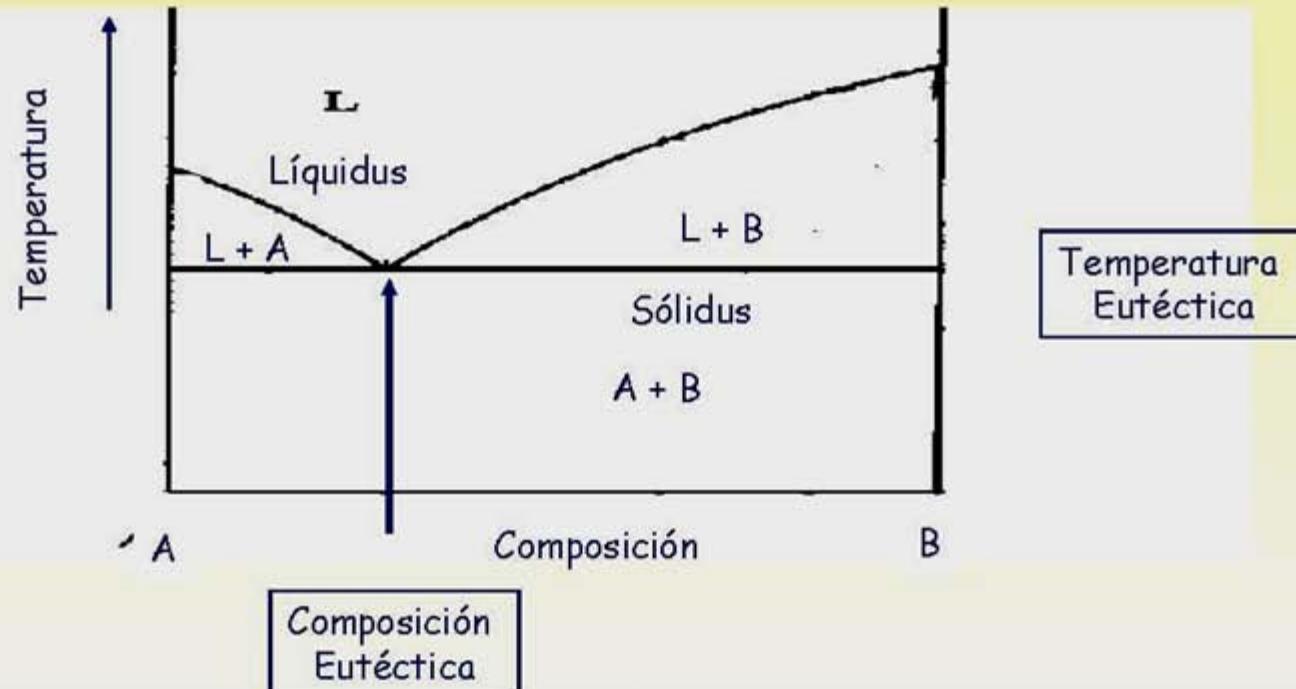


Hay tres zonas diferentes:

- 2 regiones monofásicas
 - L (líquido): única fase líquida (A y B son completamente solubles)
 - α : única fase sólida: Sol. Sól. Con una estuct. cristalina definida (A y B son completamente solubles)
- 1 región bifásica (coexistencia de dos fases: sólida + líquida)
 - L + α

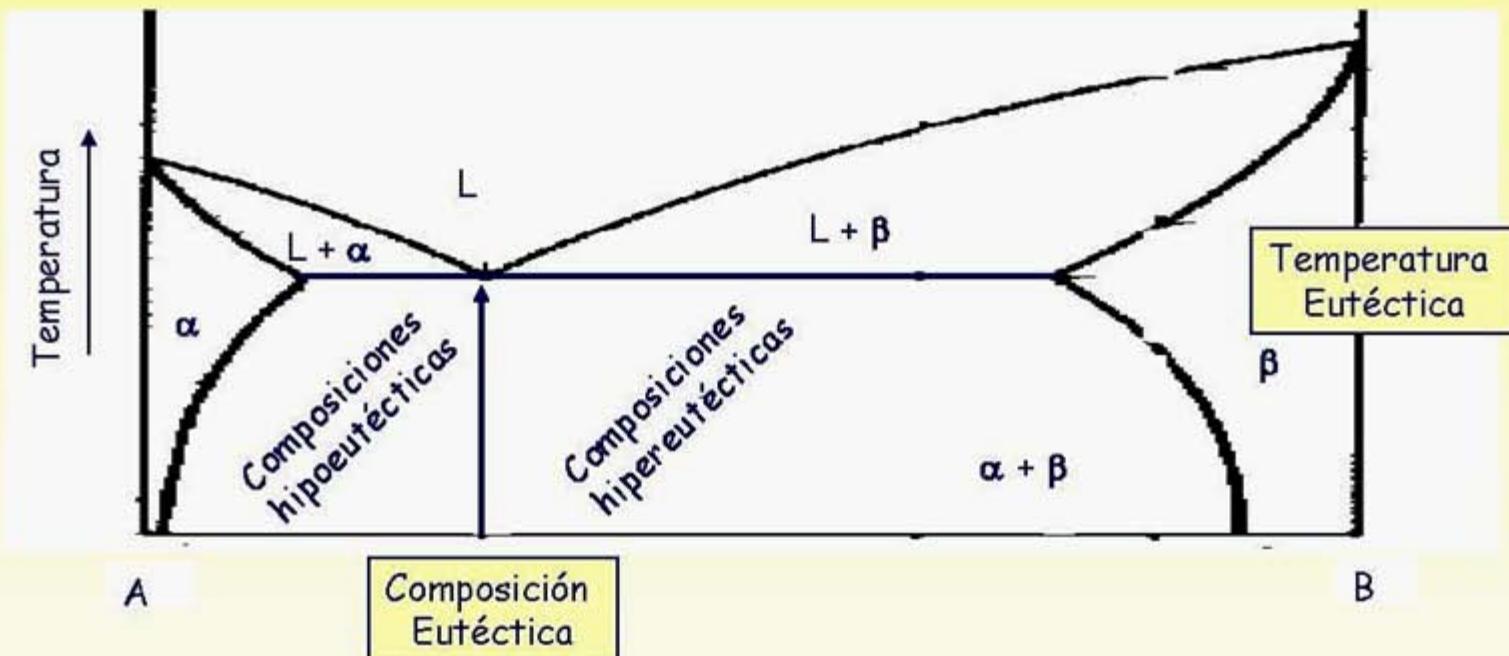
Diag. Eutéctico con Insolubilidad Total

Tema 5. Diagrama de fases



Diag. Eutéctico con Solubilidad Parcial

Tema 5. Diagrama de fases



En zonas de SS próximas a los extremos:

α : SS con igual estruct. crist. que A

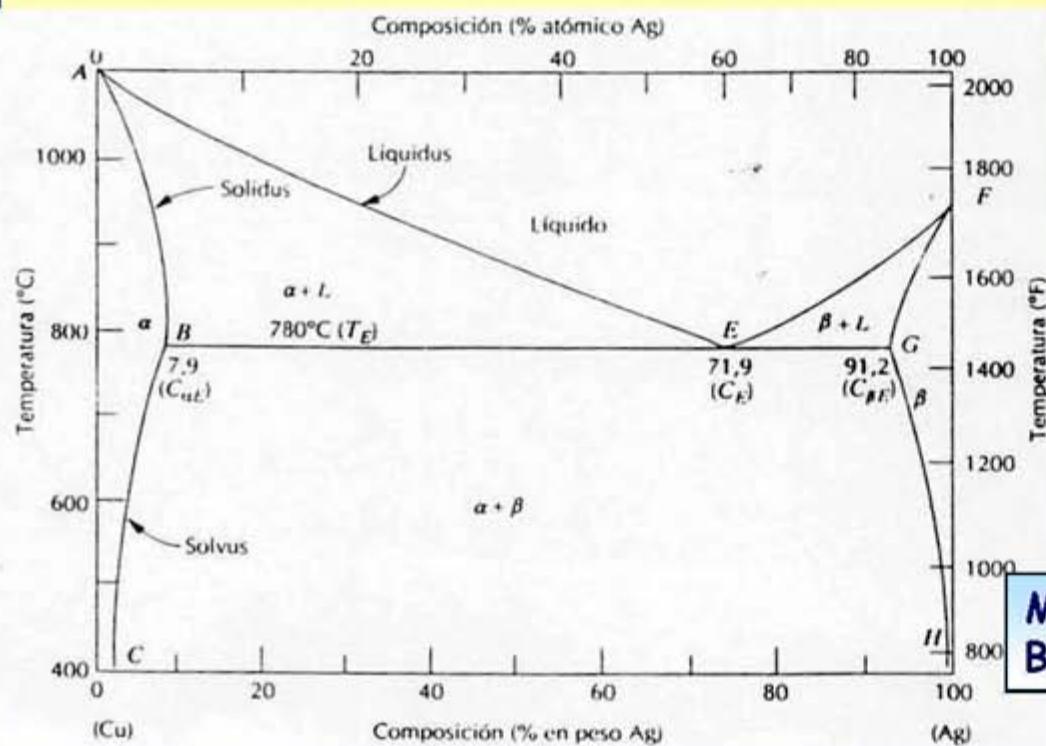
β : SS con igual estruct. crist. que B

En la zona central, En dos fases sólidas presentes:

α Y β

Diag. Solubilidad Parcial: Cu-Ag (I)

Tema 5. Diagrama de fases



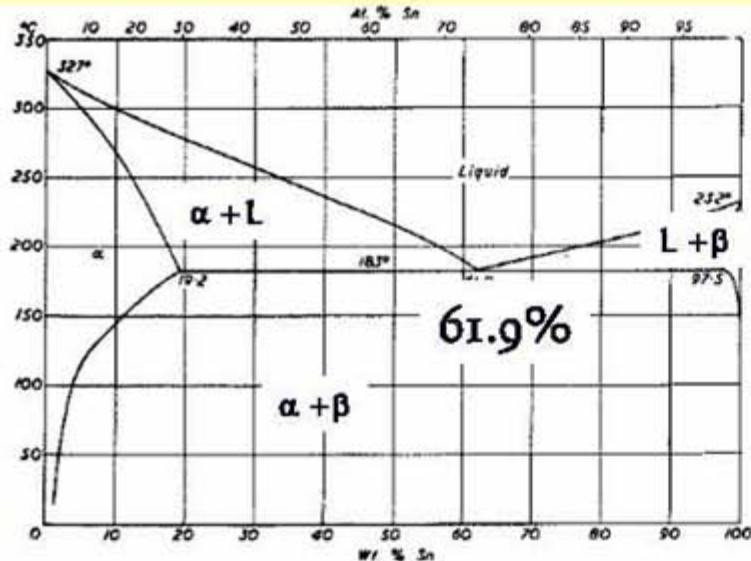
Monofásicas: L, α , β
 Bifásicas: $\alpha + \beta$, $\alpha + L$, $\beta + L$

Punto Eutéctico ($T=780^{\circ}\text{C}$): E (71.9% Ag y 28.1% Cu)

Líneas: Líquido, Sólido y Solvus

Diag. Solubilidad parcial: Pb-Sn

Tema 5-Diagrama de fases



Regiones:

Monofásicas: L, α , β

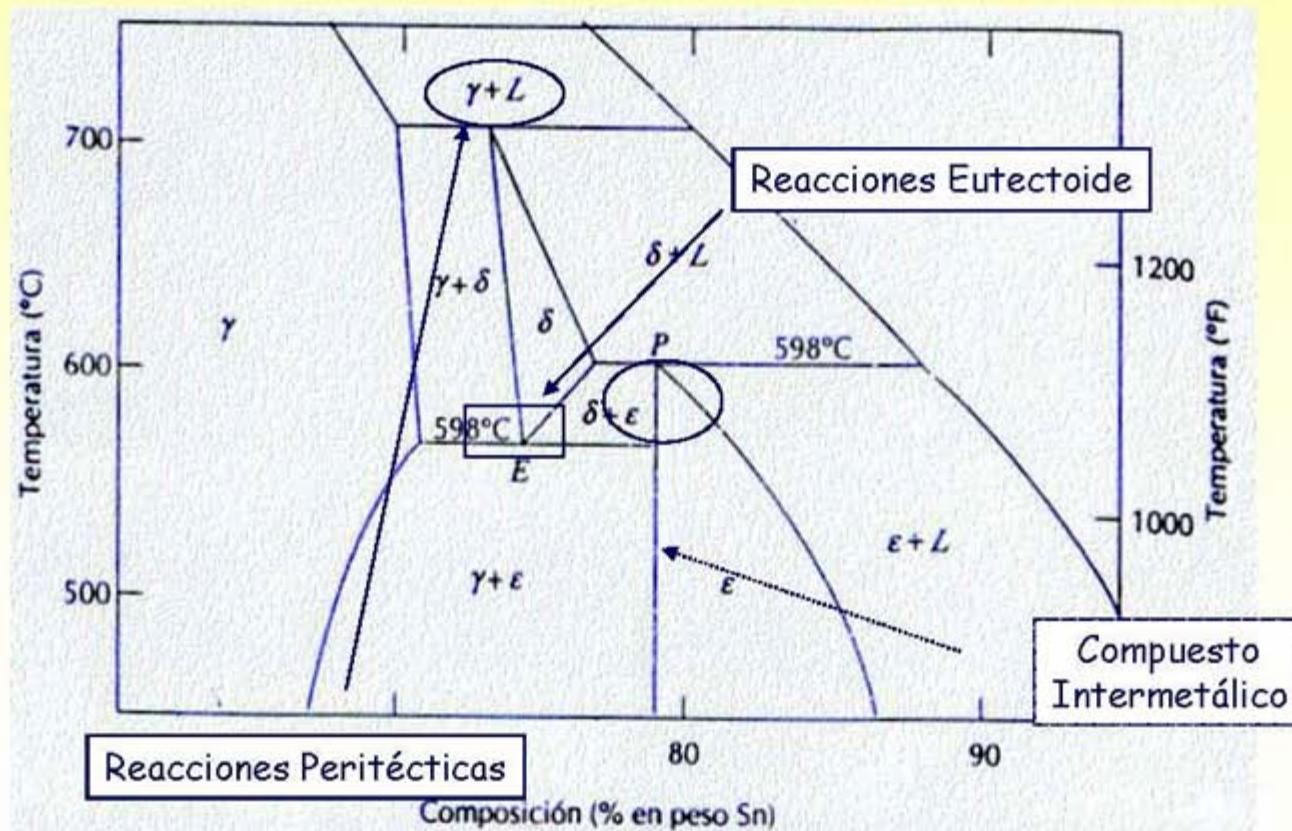
Bifásicas: $\alpha+\beta$, $\alpha+L$, $\beta+L$

Punto Eutéctico: E (61.9% Ag y 38.1% Cu)
 $T=183^{\circ}\text{C}$

Líneas: Líquidus, Sólidos y Solvus

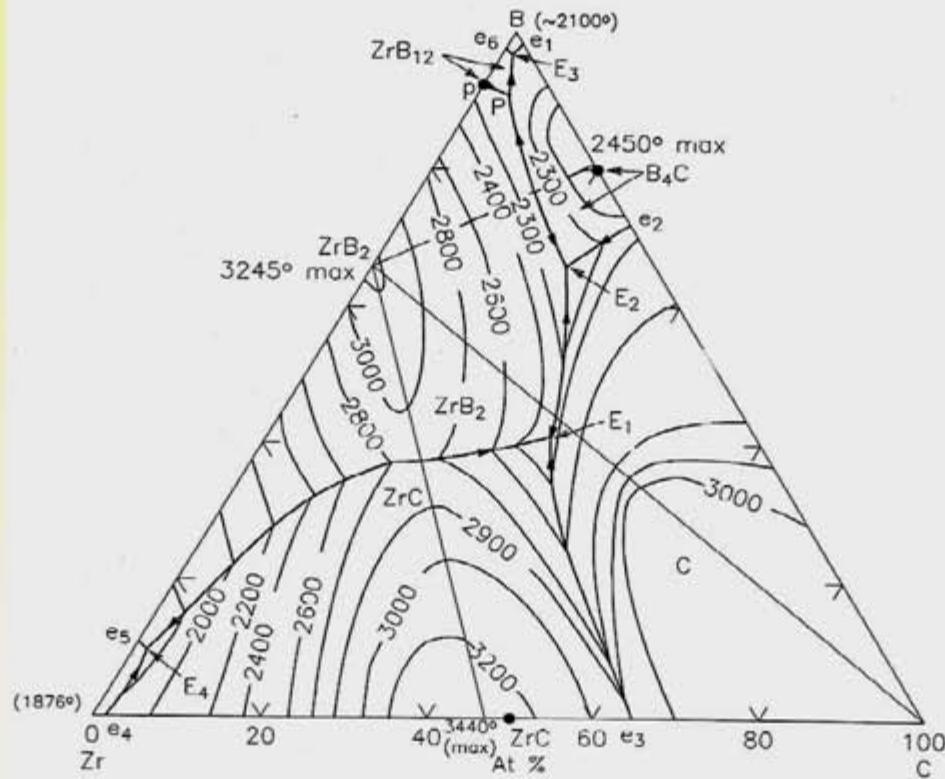
Diagramas más complejos

Tema 5-Diagrama de fases



Diagramas Ternarios

Fase I



Fase II

Fase III

Aleaciones hierro-carbono: composición, constitución y estructura

TRANSFORMACIONES EN SÓLIDO

El hierro puro tiene muy pocas aplicaciones industriales, pero formando aleaciones con el carbono y otros elementos, es el metal más empleado en la industria moderna. La aleación fundamental es la de hierro-carbono. Por eso, su estudio es fundamental en la tecnología del hierro.

Como todas las aleaciones, está caracterizada por la composición química, los constituyentes y las estructuras.

Composiciones de las aleaciones Fe-C

- 1 A temperatura ambiente, todo el carbono que está presente en las aleaciones Fe-C, se encuentra en forma de carburo de hierro, salvo una pequeñísima parte que está disuelto en hierro α (ferrita). **cementita** (Fe_3C)
2. Conforme se va elevando la temperatura, se disocia el carburo de hierro y queda el carbono formando solución sólida con el hierro γ (austenita).
 - a. Las aleaciones con contenidos de carbono comprendidos entre 0,10 y 1,76 %, tienen unas propiedades y utilidades muy definidas, en el denominado campo de los **aceros**. Los aceros, a su vez, pueden alearse con otros elementos, formando los **aceros aleados o especiales**.
 - b. Si el porcentaje de carbono sobrepasa el 1,76 %, las aleaciones hierro-carbono se llaman **fundiciones**. La máxima proporción de carbono que una aleación puede disolver es 6,67 %, compuesto denominado **cementita** (Fe_3C puro). Las fundiciones **no se pueden forjar**.

Hay que hacer notar que, tanto los aceros como las fundiciones, desde el punto de vista químico, presentan impurezas por elementos como el azufre, fósforo, etc. Este tipo de impurezas se desprecian a la hora de estudiar las aleaciones hierro-carbono y su diagrama de equilibrio.

Aleaciones hierro-carbono: composición, constitución y estructura

Constitución de las aleaciones Fe-C

Las aleaciones están formadas por constituyentes, cuya naturaleza varía en función de la concentración de sus componentes químicos y la temperatura. Los constituyentes más representativos son los siguientes:

- a) **Ferrita:** solución sólida de carbono en hierro α . Su solubilidad es tan pequeña a temperatura ambiente, que disuelve como máximo el 0,008 % de carbono. Por esta razón, se considera a la ferrita como hierro α puro. Es el más blando y dúctil constituyente de los aceros. Cristaliza como hierro alfa en red cúbica centrada en el cuerpo. Tiene una dureza de 90 HB y una resistencia a la rotura de 28 kg/mm², puede sufrir alargamientos del 30 al 40 %, y posee propiedades magnéticas. (BCC)
- b) **Cementita (Fe_3C):** es el constituyente más duro y frágil de los aceros, puede alcanzar una dureza de 800 HB, tiene propiedades magnéticas hasta los 210 °C, y a partir de esta temperatura pierde las propiedades magnéticas. Cristaliza en redes ortorrómbicas.
- c) **Perlite:** constituyente formado por 86,5 % de ferrita y 13,5 % de cementita. Tiene una dureza de 200 HB, una resistencia a la rotura de 80 kg/mm², y un alargamiento del 15 %. Presenta estructura laminar si el enfriamiento ha sido lento (perlite laminar), y más borrosa si el enfriamiento es más brusco (perlite sorbitica). Si la perlita laminar la calentamos hasta una temperatura de 723 °C, la cementita adquiere forma de glóbulos incrustados en la masa de la ferrita (perlite globular).
- d) **Austenita:** está formada por una solución sólida por inserción de carbono en hierro γ . La proporción de carbono disuelto varía desde el 0 al 1,76 %. Es el constituyente más denso de los aceros. La austenita está formada por cristales cúbicos de hierro γ , donde los átomos de carbono están intercalados en las aristas y en el centro. Su dureza puede alcanzar los 300 HB, una resistencia de 100 kg/mm², y un alargamiento de un 30 %. No es magnética. (FCC)

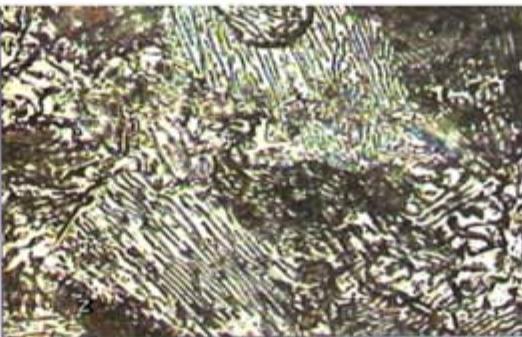


Fig. 2.17. Microestructura perlítica de un acero eutectoide mostrando láminas alternas de ferrita α (fase clara) y Fe_3C (láminas más delgadas y oscuras).

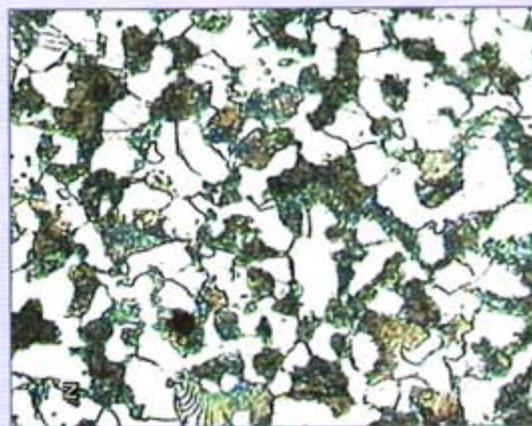


Fig. 2.18. Microfotografía de un acero 0,38 % C con una microestructura constituida por perlita y ferrita proeutectoide.



Fig. 2.19. Microestructura de un acero con 1,4 % C formado por cementita proeutectoide blanca reticulada alrededor de las colonias de perlita.

Constitución de las aleaciones Fe-C

(aceros derivados de la AUSTENITA)

e) **Martensita:** tras la cementita, es el constituyente más duro de los aceros. La martensita es una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro α . Se obtiene por enfriamiento rápido de la austenita de los aceros, después de haber sido calentada para conseguir una constitución austenítica. Se presenta en forma de agujas y cristaliza en el sistema tetragonal. La proporción de carbono no es constante y varía hasta un contenido máximo de 0,89 %, aumentando su dureza, resistencia mecánica y fragilidad con la proporción de carbono. Su dureza tiene un margen de 50 a 68 HRC, su resistencia varía de 175 a 250 kg/mm², y su alargamiento de 2,5 a 0,5 %. Presenta propiedades magnéticas. (BCT)

f) **Troostita:** constituyente intermedio de la martensita y sorbita. Se produce mediante una transformación isotérmica de la austenita entre las temperaturas de 500 a 600 °C. Se enfria rápidamente la austenita hasta el intervalo 500-600 °C, y posteriormente se mantiene la temperatura constante, hasta que toda la austenita se convierte en troostita. Se presenta en forma de nódulos de láminas radiales de cementita sobre ferrita. Su dureza es de 450 HB, y su resistencia 250 kg/mm².

g) **Sorbita:** se produce también por transformación isotérmica de la austenita a temperatura comprendida en el intervalo de 600 a 650 °C. El procedimiento es similar al anterior. Se presenta formando laminillas más finas que las de troostita y similares a las de perlita. Presenta una dureza de 350 HB, y una resistencia mecánica de aproximadamente 100 kg/mm².

h) **Bainita:** también se produce por una transformación isotérmica de la austenita, en el intervalo de temperaturas que va de 250 a 550 °C. La bainita se produce en un temple defectuoso, llamado isotérmico o bainítico. Su fin no es transformar la austenita en martensita (temple clásico), sino que es la transformación total de la austenita en bainita.

Aleaciones hierro-carbono: composición, constitución y estructura

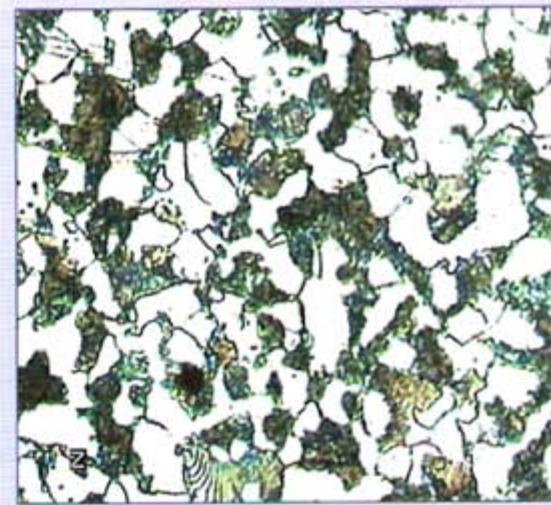


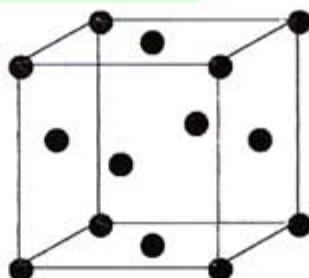
Fig. 2.18. Microfotografía de un acero 0,38 % C con una microestructura constituida por perlita y ferrita proeutectoide.

Longitudes *Ángulos*
 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

BCC (Fe δ)

BCC (Fe α) --ferrita

Cúbica centrada
en el cuerpo



FCC (austenita Fe γ + carbono)

Cúbica centrada
en las caras

cementita (carburo Fe : Fe_3C)

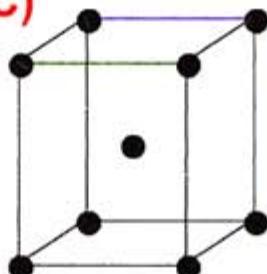
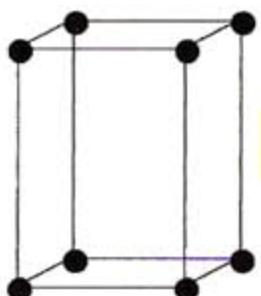
Ortorrómica

Longitudes

$a \quad b \quad c$

Ángulos

$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



BCT (martensita Fealfa + carbono)

Tetragonal centrada
en el cuerpo

Longitudes *Ángulos*

$a = b \quad c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

LAMINARES: perlita (ferrita + austenita)

troostita

sorbita

bainita

Sistemas cristalinos de los ACEROS

Aleaciones hierro-carbono: composición, constitución y estructura

Estructuras de las aleaciones Fe-C

Podemos distinguir tres tipos de estructuras:

- **Estructura cristalina:** no es uniforme, varía según los constituyentes de la aleación, y éstos cambian con la composición y temperatura.
- **Estructura micrográfica:** el elemento fundamental de esta estructura es el grano, que en los aceros tiene gran importancia, por lo que es preciso tenerlos en cuenta a la hora de la formación y desarrollo de su tamaño en los tratamientos térmicos. Las propiedades de los aceros son, en general, peores cuanto mayor es el tamaño del grano, a excepción de la capacidad de trabajarlos con máquinas, que se ve aumentada con el tamaño del grano.
- **Estructura macrográfica:** depende de las impurezas que contenga el acero y de la forja a que puede ser sometido.

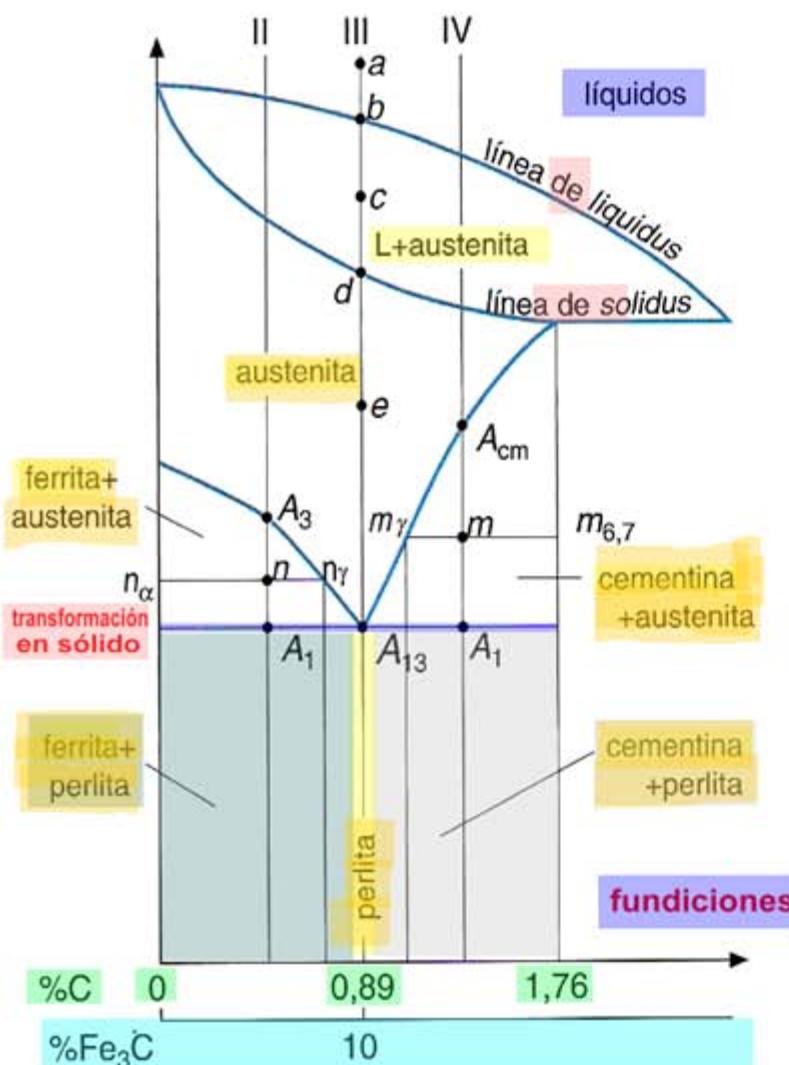


Fig. 2.20. Detalle del diagrama hierro-carburo de hierro, zona de los aceros.

Diagrama de equilibrio con transformaciones en estado sólido

Entre los diagramas de equilibrio, el correspondiente a las aleaciones hierro-carbono es el más importante desde el punto de vista industrial. Lo estudiaremos en profundidad más adelante. Sin embargo, nos vamos a ayudar de una parte del diagrama para estudiar este tipo de transformaciones.

La aleación hierro-carbono, en realidad, es una aleación hierro-carburo de hierro (Fe_3C) (6,67 % de C y 93,33 % de Fe).

En esta parte del diagrama vamos a elegir tres aleaciones tipo, identificadas con las cifras II, III y IV (Fig. 2.20).

a) Aleación III (0,89 % de C)

En **a** toda la aleación está en estado líquido. En **b** comienzan a formarse cristales de austenita. En **c** coexisten dos fases: fase líquida y fase sólida. En **d** se solidifica el último resto del líquido.

Entre **d** y A_{13} los cristales son todos de austenita, solución sólida de cementita en hierro γ .

En A_{13} el hierro γ (CCC) se transforma en hierro α (CC), que no es capaz de mantener disuelta a la cementita. Los cristales de austenita se transforman en otros de hierro α (ferrita) y carburo de hierro (cementita), denominados perlita.

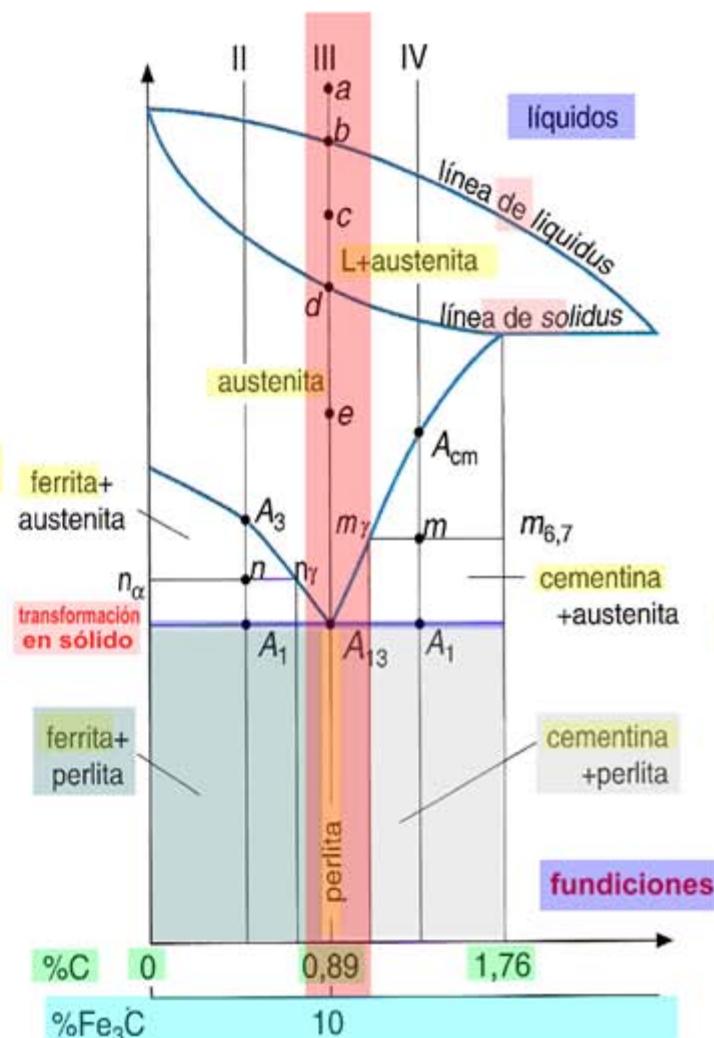


Fig. 2.20. Detalle del diagrama hierro-carburo de hierro, zona de los aceros.

Diagrama de equilibrio con transformaciones en estado sólido

b) Aleación II (C < 0,89 %)

Sucede lo mismo que en la anterior, hasta llegar al punto A_3 . En este momento empiezan a transformarse los cristales de hierro γ en hierro α o ferrita. En n (0,45% de C) ya se han transformado una serie de cristales de hierro γ en hierro α . La concentración y cantidad relativa de cada fase se calcula como en casos anteriores:

- Los cristales de ferrita son hierro puro.
- Los cristales de austenita tienen la concentración correspondiente al punto n_γ (aproximadamente 0,75% de C):

$$W_\alpha = \frac{nn_\gamma}{n_\gamma n_\alpha} \cdot 100 = \frac{0,30}{0,75} \cdot 100 = 40\% \text{ ferrita}$$

$$W_\gamma = \frac{nn_\alpha}{n_\gamma n_\alpha} \cdot 100 = \frac{0,45}{0,75} \cdot 100 = 60\% \text{ austenita, o}$$

$$w_\gamma = 100 - w_\alpha = 100 - 40 = 60\% \text{ austenita}$$

- Al alcanzar A_1 se tendrán cristales de hierro α y austenita (0,89% de C), y las cantidades serán:

$$w_\alpha = \frac{0,89 - 0,45}{0,89} \cdot 100 = 49\% \text{ ferrita} \quad w_\gamma = \frac{0,45}{0,89} \cdot 100 = 51\% \text{ austenita, o}$$

$$w_\gamma = 100 - w_\alpha = 100 - 49 = 51\% \text{ austenita}$$

- Del punto A_1 , hacia abajo, la ferrita primaria sigue invariable y la austenita de concentración 0,89% de carbono se transforma en perlita (Fig. 2.21).

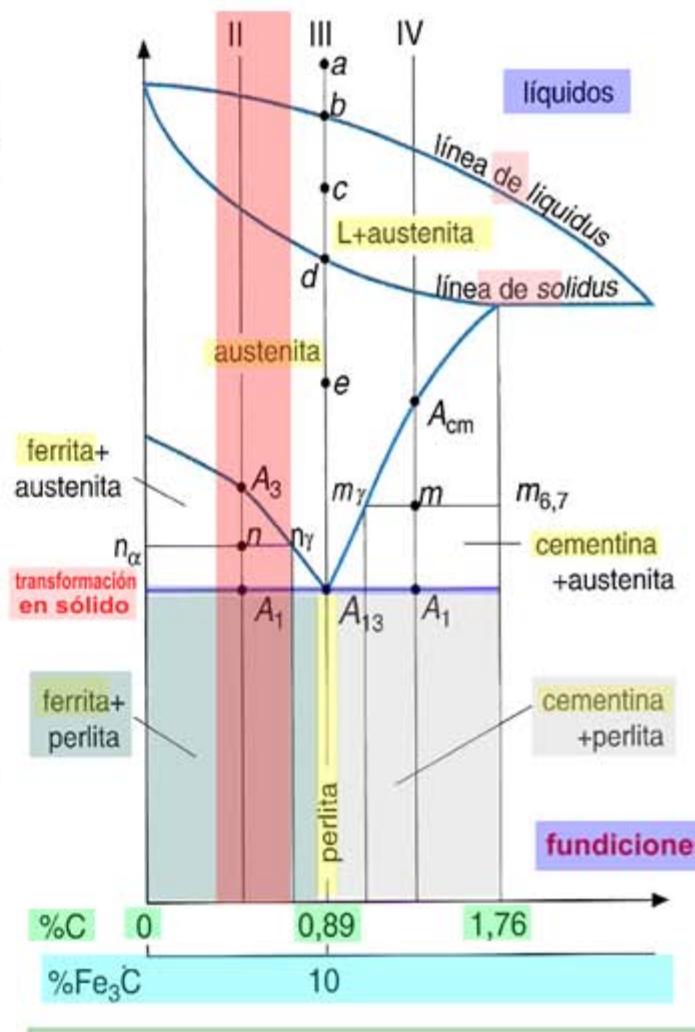


Fig. 2.20. Detalle del diagrama hierro-carburo de hierro zona de los aceros.

Diagrama de equilibrio con transformaciones en estado sólido

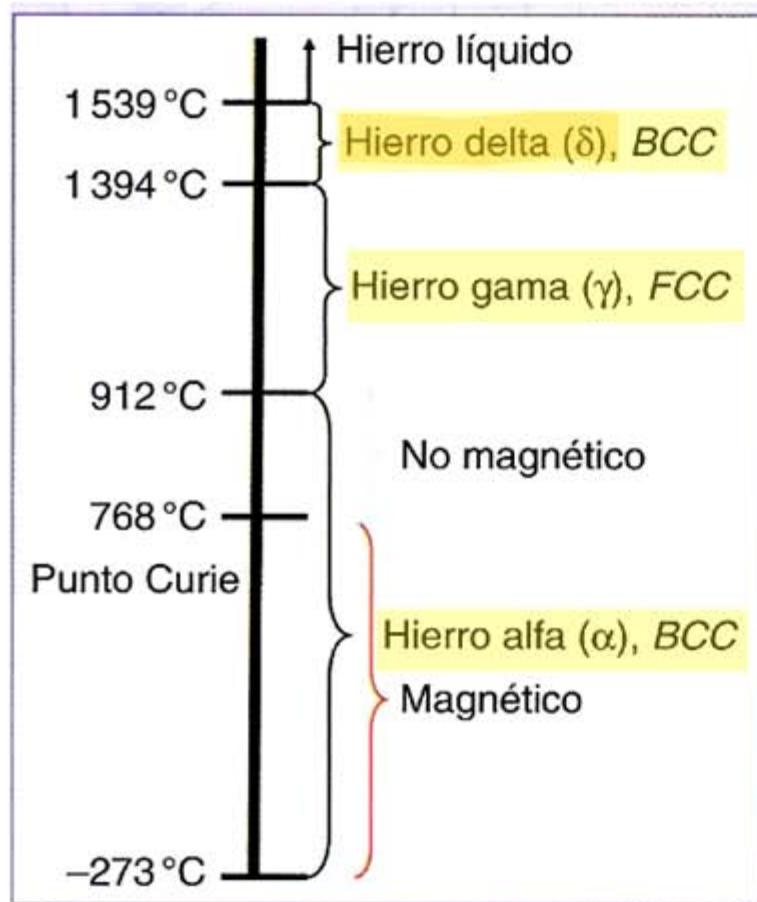


Fig. 2.21. *El hierro puro presenta tres variedades alotrópicas durante el enfriamiento. Al pasar la red cristalina de BCC a FCC hay una disminución de volumen y, por tanto, un aumento de la densidad. Esto es debido a que en la red FCC los átomos están más «empaquetados» que en la BCC.*

Diagrama de equilibrio con transformaciones en estado sólido

c) Aleación IV (C > 0,89 %)

Sucede lo mismo que en los otros casos hasta llegar al punto A_{cm} , donde comienzan a formarse cristales de cementita. A partir de ese punto va empobreciéndose la austenita en contenido de carbono, y al llegar al punto A_1 alcanza la concentración A_{13} (0,85 % de C). En los puntos intermedios entre A_{cm} y A_1 se puede saber la concentración de la austenita y de la cantidad de ella y de la cementita segregada.

Para m se tendrá que la concentración de austenita es la correspondiente al punto mg (aproximadamente 1,1 % de C). Las cantidades serán:

$$w_{Fe_3C} = \frac{mm_y}{m_{6,7}m_y} \cdot 100 = \frac{1,3 - 1,1}{6,7 - 1,1} \cdot 100 = 3,57\% \text{ cementita}$$

$$w_\gamma = 100 - w_{Fe_3C} = 100 - 3,57 = 96,43\% \text{ austenita}$$

Por debajo de A_1 se transforma en perlita, y la cementita permanece.

Si se compara esta parte del diagrama Fe-C, con los diagramas de aleaciones eutécticas, se aprecia la similitud de formas y su comportamiento semejante. Existe una gran diferencia, y es que en el diagrama Fe-C se parte de una aleación en estado sólido y las transformaciones se logran siempre en este estado. Debido a esta similitud, a la aleación de 0,89 % de C se le llama **eutectoide**.

El constituyente eutectoide es la perlita, formada por cristales mixtos de los dos componentes, hierro y carburo de hierro, también como en aquéllos, que eran cristales mixtos de A y B.

Las aleaciones de menos de 0,89 % de C se llaman **hipoeutectoides** y las de más de 0,89 **hipereutectoides**.

La adición de otros elementos de aleación al Fe-C cambia por completo el diagrama de fases. Así, la adición de W hace elevar la temperatura del punto eutectoide, sin embargo la adición de Ni hace que baje. En general, los aceros se alejan para modificar su resistencia a la corrosión o sus propiedades en tratamiento térmico

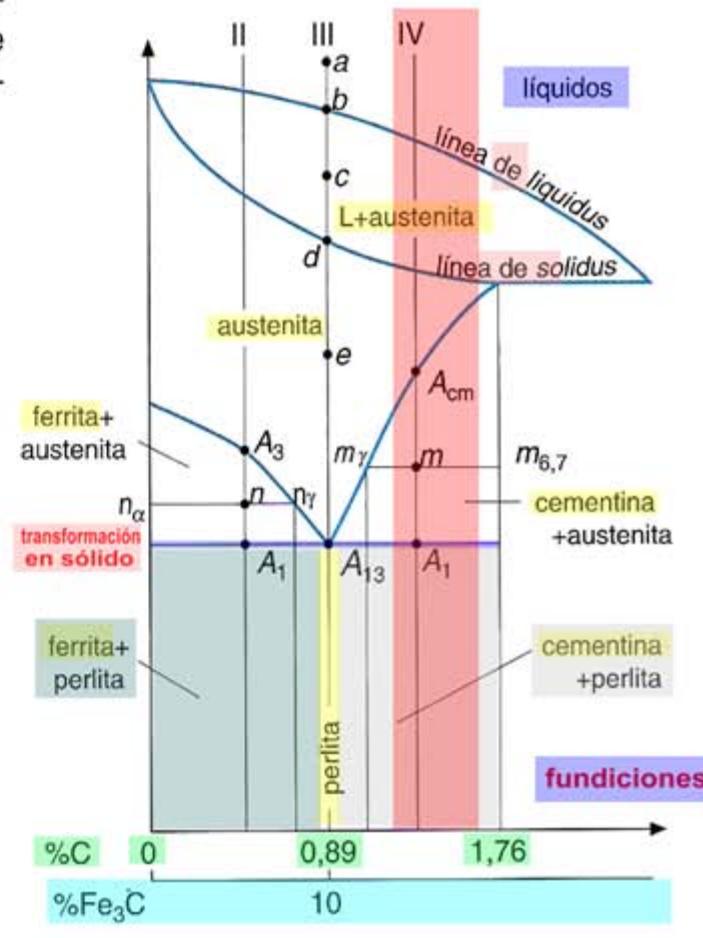


Fig. 2.20. Detalle del diagrama hierro-carburo de hierro, zona de los aceros.

Análisis del diagrama Fe-C

55

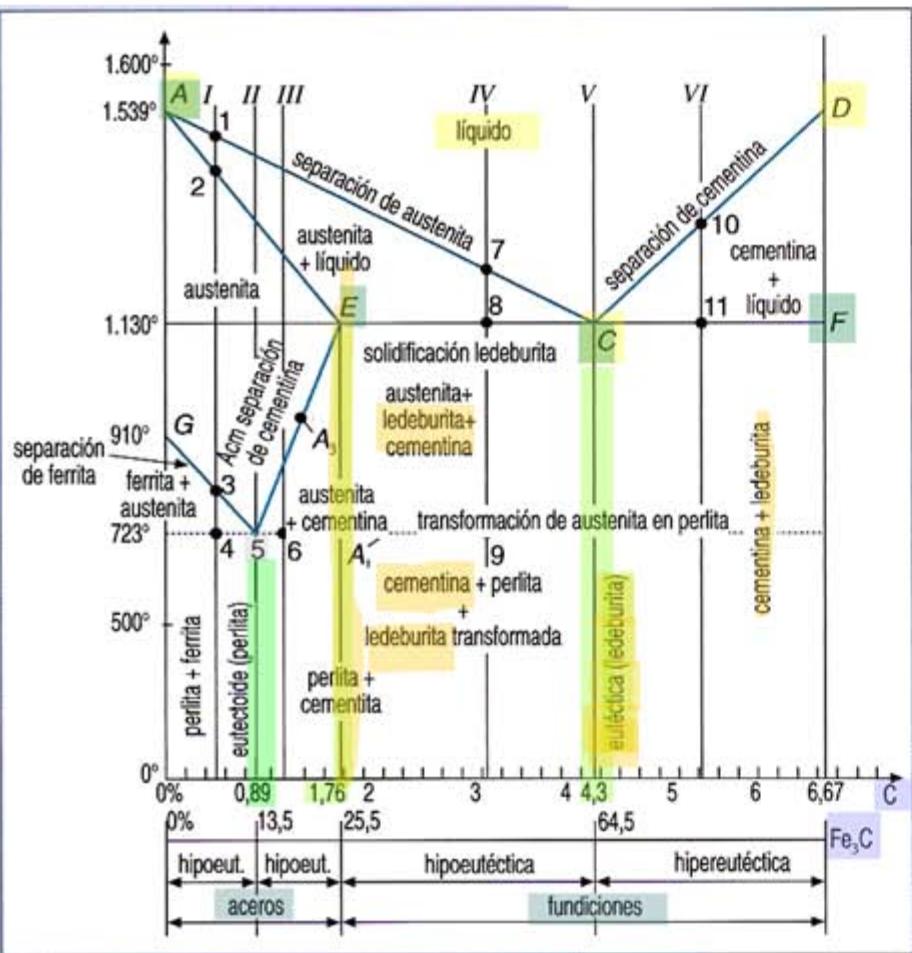


Fig. 2.22. Diagrama Fe-C simplificado.

Conocidos los componentes y constituyentes que podemos encontrar en las aleaciones hierro-carbono, vamos a determinar cuáles de ellos las forman, según sean las proporciones de hierro y carbono, así como la temperatura a que se encuentran.

En la Fig. 2.22 se ha representado un diagrama simplificado de hierro-carbono de su observación y análisis; se puede deducir:

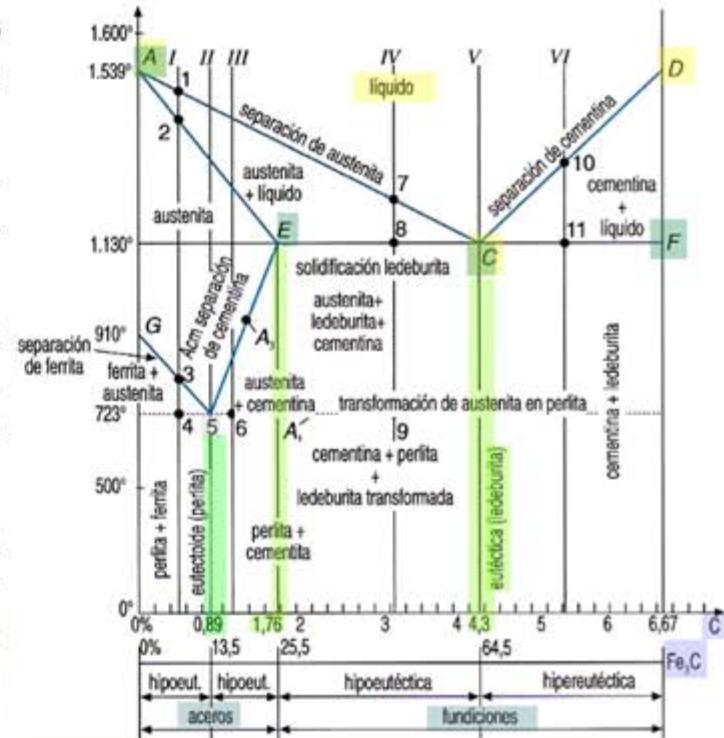
- La línea ACD es la línea de *liquidus*, a partir de la cual comienzan a solidificar las aleaciones del sistema. La línea AECF o línea de *solidus* indica las temperaturas pertenecientes al final de la solidificación.
- En el diagrama se pueden destacar una serie de puntos:
 - El punto A coincide con la temperatura de solidificación del hierro en estado puro.
 - El punto C representa la aleación eutéctica, con una proporción de carbono del 4,3%, compuesta por austenita y cementita formando la ledeburita.
 - El punto E es el de máxima solubilidad del carbono en hierro γ, que corresponde a una proporción de carbono del 1,76%.

- El punto D está en el límite del diagrama 6,67 % de carbono que corresponde a la cementita pura.
- En el punto 5 o eutectoide, la austenita se transforma en perlita. Esta aleación tiene el 0,89 % de carbono.

Análisis del diagrama Fe-C

Para la mejor comprensión del diagrama, estudiaremos el proceso de solidificación de seis aleaciones de los siguientes porcentajes de carbono: 0,5; 0,89; 1,2; 3,2; 4,3 y 5,4 %.

- Aleación I (0,5 % de C).** Por encima del punto 1 existe solamente la fase líquida. Comienza la formación de austenita hasta que en 2 solidifica totalmente. En el punto 3 el hierro y se transforma progresivamente en ferrita o hierro α . Mientras dura la transformación anterior, la austenita residual se enriquece en carbono hasta que en el punto 4, con una proporción de 0,89 % de C, se convierte en perlita.
- Aleación II (0,89 % de C).** Comportamiento idéntico al anterior, con una sensible diferencia, y es que no existe el punto 3, porque toda la austenita se transforma bruscamente en perlita. Es la llamada **eutectoide**.
- Aleación III (1,2 % de C).** En el punto 4 comienzan a separarse cristales de cementita, empobreciéndose progresivamente en carbono la austenita restante, hasta que en el punto 6 a la temperatura de 723 °C el porcentaje es de 0,89 %, y se transforma bruscamente en perlita.
- Aleación IV (3,2 % de C).** En el punto 7 comienza la solidificación y se forma austenita. Cuando el líquido residual llega a la línea eutéctica, todo él se transforma en **ledeburita**, punto 8. Conforme desciende la temperatura, la austenita va segregando cementita preeutéctica, hasta que en el punto 9 se convierte en **perlita**. Como la ledeburita está formada por el 52 % de cementita primaria y el 48 % de austenita, también se transforma en perlita (**ledeburita transformada**).
- Aleación V (4,3 % de C).** Idéntica a la anterior, aunque en el punto C presenta un paso brusco de solidificación en **ledeburita** (aleación eutéctica).
- Aleación VI (5,4 % de C).** En el punto 10 comienzan a formarse cristales de cementita, mientras que la fase líquida va perdiendo carbono hasta que a la temperatura de 1130 °C solidifica en ledeburita con un porcentaje de carbono de 4,3 %. **ledeburita**



- Composición hipoeutéctica.** Aquella que se encuentra a la izquierda del punto eutéctico.
- Composición hipereutéctica.** Aquella que se encuentra a la derecha del punto eutéctico.

Aleaciones férreas

Su principal componente es el hierro, y son las que más se producen y utilizan. Esto puede ser debido a las siguientes razones:

- 1 • En la corteza terrestre existen abundantes compuestos de hierro.
- 2 • Los aceros se pueden fabricar mediante técnicas relativamente económicas.
- 3 • Las aleaciones férreas son muy versátiles, es decir, se pueden modificar hasta conseguir determinadas propiedades físico-químicas y mecánicas.

Su principal inconveniente es su facilidad de corrosión.

- Se puede establecer su clasificación en función del porcentaje de carbono.
 - **Acero.** Aleación de Fe-C forjable, cuya proporción de carbono está comprendida entre 0,10-1,76 %.
 - **Fundición.** Aleación Fe-C no forjable, cuya proporción de carbono está comprendida entre 1,76-5 %. **(6,67 %)**
 - **Hierro.** Metal técnicamente puro, o con una proporción de carbono inferior a 0,03 %. Se puede obtener por procedimientos electrolíticos, pero tiene pocas aplicaciones industriales.
 - **Grafito.** Con una proporción de carbono superior a 5 %. **(6,67 %)**
- **Aleaciones y metales férreos.** Metales y aleaciones que contienen un alto porcentaje de hierro.

Clasificación de los aceros

58

En función del procedimiento de fabricación

Los aceros se clasifican en aceros Bessemer, Thomas, Siemens, eléctricos, al crisol y hierros pudelados (aceros de bajo contenido en carbono).

En España, los aceros más utilizados son los Bessemer, Siemens y eléctricos. Las especificaciones técnicas de estos tres tipos de aceros se reflejan en la tabla siguiente.

Aceros/componentes	% P	% S	% O ₂	Aplicaciones
Aceros Bessemer	0,035	< 0,07	< 0,06	0,15 Aceros comunes
Aceros Siemens	0,020	< 0,04	< 0,06	0,10 Aceros comunes
Aceros eléctricos	0	< 0,035	< 0,035	0,050 Aceros al C y aleados

Tabla 2.2. Composición de los aceros Bessemer, Siemens y eléctricos.

Recuerda

Los aceros inoxidables son un grupo de aceros que contienen un 12 % de cromo, proporcionando una extraordinaria resistencia a la corrosión.

Los aceros para herramientas tienen un alto contenido en carbono que les proporciona alta dureza, alta tenacidad y una elevada resistencia mecánica a temperaturas altas.

En función del porcentaje de carbono

Existen tres tipos de aceros:

- **Aceros hipoeutectoides.** En ellos, el porcentaje de carbono es inferior al del punto eutectoide.
- **Aceros eutectoides.** En éstos, el porcentaje de carbono es igual al del punto eutectoide.
- **Aceros hipereutectoides.** El porcentaje de carbono es superior al del punto eutectoide.

El punto eutectoide para los aceros al carbono corresponde a un 0,89 % de carbono.

Clasificación de los aceros

En función de su constitución interna

59

Esta clasificación es válida para aceros calentados hasta austenización completa y enfriados al aire. Puede ocurrir que si las piezas son muy grandes, el núcleo o centro de la pieza tenga una constitución distinta a la superficie y capas superficiales.

- **Aceros perlíticos.** Constituidos después del enfriamiento por perlita y ferrita o perlita y cementita, dependiendo de si el porcentaje de carbono es menor o mayor al eutectoide. Son los aceros normales, los aceros al carbono y los aceros de baja y media aleación.
- **Aceros martensíticos.** Formados en su mayor parte por martensita. En realidad son aceros perlíticos, cuya velocidad de temple es muy lenta, y son templados después del enfriamiento al aire. Como ejemplo, caben citarse los aceros al Cr-Ni y Cr-Ni-Mo, y los aceros inoxidables de 0,30 % de C y 30 % de Cr.
- **Aceros austeníticos.** Constituidos por austenita a la temperatura ambiente. Entre ellos destacan los aceros al Cr-Ni y los inoxidables de 18 % de Cr. Son fácilmente reconocibles porque no son atraídos por un imán, ya que el hierro γ de la austenita no es magnético.
- **Aceros ferríticos.** Están formados por ferrita a cualquier temperatura. No se pueden templar porque no alcanzan el estado austenítico por calentamiento y, por tanto, el martensítico en el enfriamiento. Pertencen a este grupo los aceros de bajo contenido de carbono.
- **Aceros con carburo.** Contienen un porcentaje de carburos de elementos de aleación muy superiores al que se considera como normal en los aceros al carbono. La temperatura de temple es más elevada, de 900 a 1 300 °C, para conseguir la dilución de los carburos. Ejemplos: aceros rápidos, indeformables, etcétera.

En función de su composición

- Los aceros al carbono están formados por hierro y carbono, y el porcentaje de otros elementos no debe superar los preestablecidos según las normas.
- Los aceros aleados, además del carbono e impurezas, contienen elementos de aleación voluntaria, como cromo, níquel, molibdeno, etc. Estos elementos aleados modifican las propiedades de los aceros, aumentando o disminuyendo la templabilidad, la dureza, etc.

Tabla 2.3. Clasificación de los aceros según la norma UNE 36010.

Clasificación 60 de los aceros

Serie	Grupo	Propiedades y aplicaciones
1. Aceros finos de construcción general	1. Finos al carbono 2. y 3. Aleados de gran resistencia 4. Aleados de gran elasticidad 5. y 6. De cementación 7. De nitruración	Son no aleados. Cuanto más carbono contienen son más duros y menos soldables. Se incluyen también aceros con tratamientos térmicos y mecánicos específicos para dar resistencia, elasticidad, ductilidad, y dureza superficial.
2. Aceros para usos especiales	1. De fácil mecanización 2. De fácil soldadura 3. De propiedades magnéticas 4. De dilatación térmica específica) 5. (Resistentes a la fluencia)	Generalmente son aceros aleados o tratados térmicamente.
3. Aceros resistentes a la oxidación y corrosión	1. Inoxidables 2. Para válvulas de motores 3. Refractarios	Son aceros basados en la adición de cantidades considerables de cromo y níquel, a los que se suman otros elementos para propiedades más específicas. Resistentes a ambientes húmedos, agentes químicos y altas temperaturas.
4. Aceros de emergencia	1. y 2. De alta resistencia 3. Para cementar	
5. Aceros para herramientas	1. Al carbono para herramientas 2., 3. y 4. Aleados para herramientas 5. Rápidos	Son aceros aleados con tratamientos térmicos que les dan características muy particulares de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste y a la deformación por calor.

Fundiciones

Son aleaciones férricas con un porcentaje de carbono superior al 2,1 %. En la práctica, las fundiciones contienen entre el 3 y el 4,5 % de carbono. Funden a temperaturas inferiores a los aceros, que varían entre 1150 y 1300 °C, por lo que se moldean con facilidad. La tendencia que tienen las fundiciones a la grafitización (formación de grafito) se regula mediante la composición y la velocidad de enfriamiento. En la mayoría de las fundiciones, el carbono aparece como grafito, y la microestructura y las propiedades mecánicas dependen de la composición y del tratamiento térmico. Los tipos más comunes de fundición son fundición gris, esferoidal, blanca y maleable.

- **Fundición gris**
- **Fundición esferoidal**
- **Fundición blanca y maleable**

Fundiciones

Fundición gris

El carbono varía entre el 2,5 y el 4,0 %. Generalmente, en las fundiciones grises el grafito aparece en forma de escamas o láminas (Fig. 2.23).

Mecánicamente son frágiles y poco resistentes a la tracción. La resistencia y la ductilidad a los esfuerzos de compresión son muy elevados. Una propiedad muy característica de estas fundiciones es su efectividad en el amortiguamiento de las energías de tipo vibracional, de ahí que se construyan con fundición gris las bancadas de las máquinas. Tienen alta resistencia al desgaste. Son muy fáciles de moldear por su gran fluidez y, por tanto, se pueden obtener piezas de formas muy complicadas que, al solidificar, presentan poca contracción. Son uno de los materiales férricos más baratos.



Fig. 2.23. Microfotografía de una fundición gris.

Fundiciones

Fundición esferoidal

Se forma con pequeñas adiciones de magnesio y/o cesio a la fundición gris, que modifican su microestructura, resultando que el grafito, en vez de escamas, presenta forma esferoidal (Fig. 2.24).

Las fundiciones esferoidales son más resistentes y más dúctiles que las grises de grafito laminar, y tienen propiedades mecánicas similares a las del acero. Por ejemplo, una fundición dúctil ferrítica tiene una resistencia a la tracción comprendida entre 380 y 480 MPa. Estas fundiciones se utilizan para fabricar cuerpos de bomba, pistones, cigüeñales, etcétera.

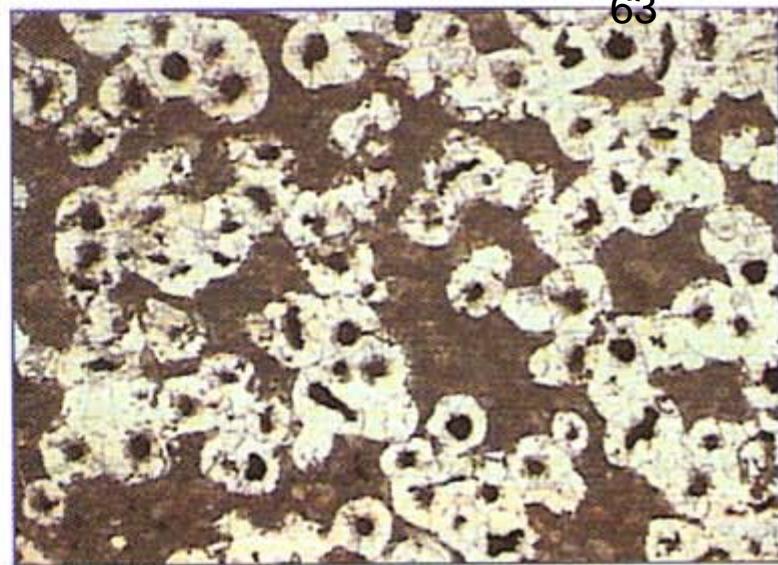


Fig. 2.24. Fundición esferoidal.

Fundiciones

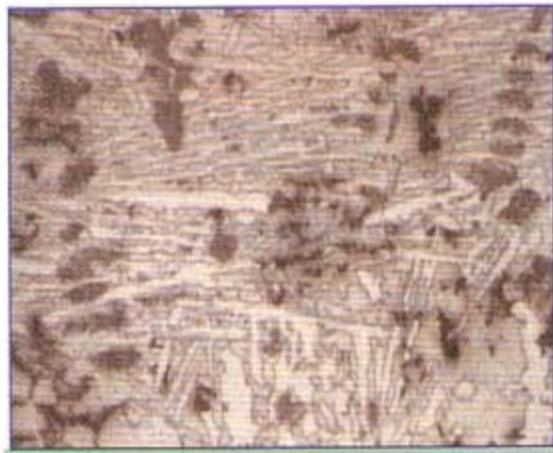


Fig. 2.25. Fundición blanca. 1

Fundición blanca y maleable

1. Partiendo de fundiciones bajas en carbono, que contengan menos de 1,0 % de silicio, y aumentando considerablemente la velocidad de enfriamiento, la mayoría del carbono se convierte en cementita en lugar de grafito, obteniendo la denominada fundición blanca, porque su superficie de rotura presenta este color (Fig. 2.25).

A causa de la gran cantidad de cementita que presenta, la fundición blanca es extremadamente dura y muy frágil, hasta el punto de no poderse mecanizar. Su aplicación se limita a componentes de gran dureza y resistencia al desgaste y sin ductilidad, como los cilindros de laminación.

2 Calentando la fundición blanca hasta temperaturas comprendidas entre 800 y 900 °C durante largo tiempo y en atmósfera inerte (para prevenir la oxidación), la cementita se descompone y forma grafito en forma de racimos o rosetas (Fig. 2.26).

La microestructura es similar a la de la fundición esferoidal, por lo que presenta una resistencia relativamente alta y apreciable ductilidad o maleabilidad. Sus aplicaciones se encuentran en engranajes de transmisión, cajas de diferencial, etcétera.

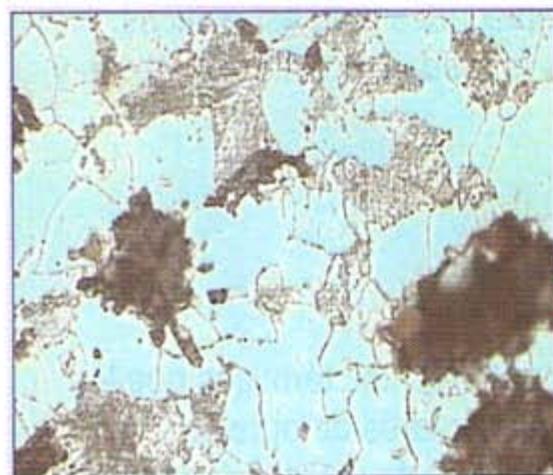
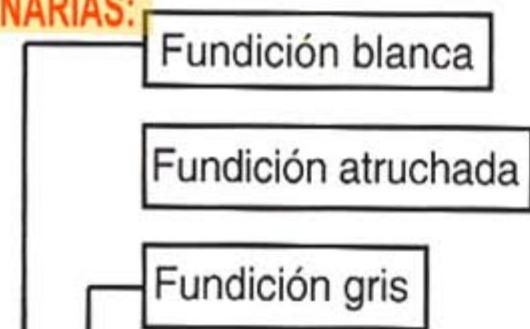


Fig. 2.26. Microfotografía de la fundición maleable. 2

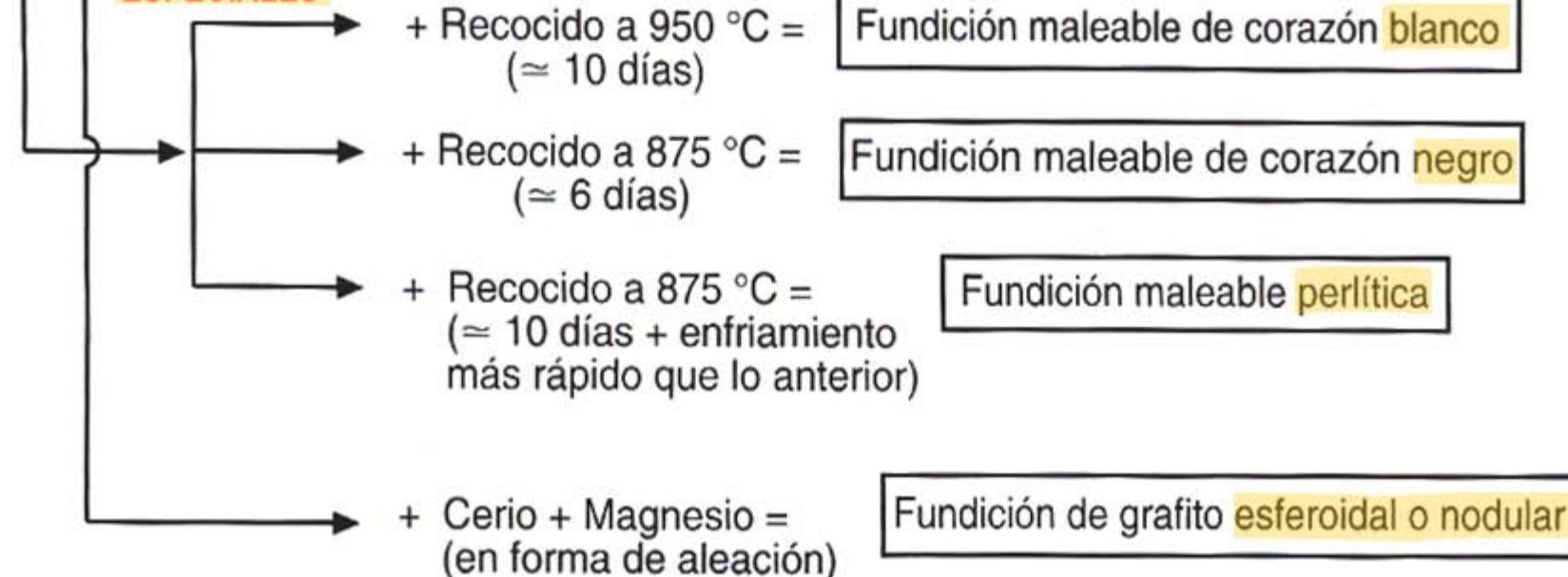
FUNDICIONES - clasificación - esquema

*ORDINARIAS:



*ALEADAS
Elementos + (Mn, Cr, Ni, ...) = Fundiciones aleadas

*ESPECIALES



FUNDICIONES - clasificación

Las fundiciones se clasifican atendiendo a la **fractura** (aspecto y color que adquiere cuando se rompe), las **propiedades** y la **composición**

Fundición	Tipos	Características
1. Ordinaria Solamente lleva hierro y carbono (sin elementos de aleación)	<ol style="list-style-type: none"> Fundición blanca Fundición gris Fundición atruchada 	<p>Es muy dura y frágil. Solamente se emplea como materia prima para fabricar aleaciones maleables.</p> <p>Su color es gris, porque el carbono está en forma de grafito. Se usa en fundiciones maleables de grafito esférico.</p> <p>Tiene unas propiedades intermedias entre la fundición blanca y la gris.</p>
2. Aleada	Además de hierro y carbono (en las proporciones adecuadas), lleva <u>otros elementos químicos</u> que mejoran sus propiedades.	
3. Especial Emplea como materia prima las fundiciones ordinarias. Luego se somete a un tratamiento térmico	<ol style="list-style-type: none"> Maleable de corazón blanco Maleable de corazón negro Maleable perlítica Maleable de grafito esférico o nodular 	<p>Se moldea la pieza en fundición blanca. Se recubre la pieza de mineral de hierro y se introduce en un horno a unos 1000 °C, durante unos 10 días. Se va enfriando lentamente el horno durante unos 5 días, hasta temperatura ambiente.</p> <p>Se moldea la pieza en fundición blanca. Se recubre la pieza de arena y se introduce en un horno a unos 900 °C durante 6 días, aproximadamente. Se va enfriando lentamente el horno durante unos 5 días, hasta temperatura ambiente.</p> <p>Se moldea la pieza en fundición blanca. Se recubre de arena y se mete en un horno a una temperatura de 900 °C durante 5 días. Luego se enfria lentamente durante unos 2 días, hasta temperatura ambiente.</p> <p>A la fundición gris se le añade cerio y magnesio. Luego se echa en un molde y se deja enfriar a temperatura ambiente.</p>

- 1 ¿Qué es una aleación?
- 2 ¿Quién es el disolvente en una aleación?
- 3 Calcular la composición porcentual en masa que tiene una aleación con 220 kg de Ti, 14,5 kg de Al y 9,5 kg de V.
- 4 Se desea obtener una aleación de acero al 0,85% de Cr. Calcular la cantidad de Cr que se deben añadir a 2 Tm de acero que carece de dicho elemento.
- 5 Una ferroaleación contiene el 65% de Cr. ¿Qué cantidad de dicha ferroaleación se debe utilizar para preparar la aleación anterior?
- 6 ¿Cuál es el objetivo de añadir elementos de aleación a un metal?
- 7 A un metal se le añade un elemento de aleación cuyo tamaño atómico es superior para formar una aleación de sustitución. ¿Qué cabe esperar del límite elástico?
- 8 ¿Qué es una solución sólida de inserción?
- 9 Con ayuda de la Tabla 2.1 determina la energía necesaria, expresada en kWh, para fundir 1 000 kg de titanio. Compara con la precisa para fundir la misma cantidad de magnesio y de hierro.
- 10 Si las densidades del magnesio, titanio y hierro son respectivamente 1 740, 4 540 y 7 870 kg/m³, compara la anterior energía pero para fundir 1 m³ de cada material en lugar de 1 000 kg.
- 11 ¿Cómo se llaman los núcleos de formación de redes cristalinas en la solidificación de metales puros?
- 12 ¿En qué consisten los rechupes y las sopladuras?
- 13 Define componente, fase y grados de libertad de un sistema material.
- 14 ¿En qué estado se encuentran las aleaciones por encima de la línea de *liquidus*? ¿Y por debajo de la línea de *solidus*?
- 15 Te facilitamos a continuación unos tamaños atómicos y estructuras cristalinas de metales. Propón las parejas que pueden formar una aleación isomorfa.

Metal	Estructura cristalina	Radio atómico (nm)
Al	FCC	0,144
Cu	FCC	0,128
Au	FCC	0,144
Ni	FCC	0,125
Al	FCC	0,143
Na	BCC	0,185
W	BCC	0,137
Pt	BCC	0,138
K	BCC	0,231
Ir	FCC	0,135

- 16 ¿Qué es una aleación eutéctica? ¿Cuáles son sus características fundamentales?

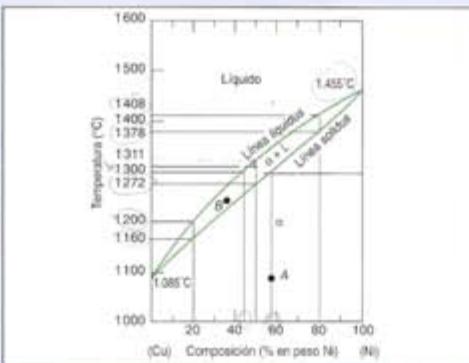
Concentración (% Au)	Temperaturas <i>liquidus</i> (°C)	Temperaturas <i>solidus</i> (°C)
0	1 085	1 085
20	1 042	1 019
40	996	973
60	946	934
80	911	911
90	942	928
95	984	974
100	1 064	1 064

- 17 Para una aleación Cu-Au se facilitan las temperaturas de la línea de *liquidus* y de *solidus*. Dibujar el diagrama resultante.

- 18 Dibuja la parte del diagrama Fe-C que corresponde sólo a los aceros. Distingue las transformaciones que ocurren en función del porcentaje de carbono.

- 19 ¿Qué variedades alotrópicas presenta el hierro?

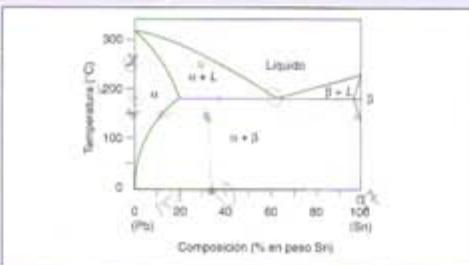
- 20 Observa el siguiente diagrama de fases Cu-Ni.



Responde a las siguientes cuestiones:

- ¿Cuál es la temperatura de inicio y fin del proceso de solidificación para las siguientes composiciones?
 - 20 % de Cu. • 50 % de Cu. • 20 % de Ni.
- ¿Cuál es la temperatura mínima en que encontraremos la aleación en estado líquido, para cualquier composición?
- ¿A partir de qué tanto por ciento de Cu una aleación estaría totalmente líquida a 1300 °C? ¿Y sólida?
- Calcula el número de fases, composición de cada una y cantidades relativas de cada fase para una aleación del 50 por 100 de Cu a 1300 °C.

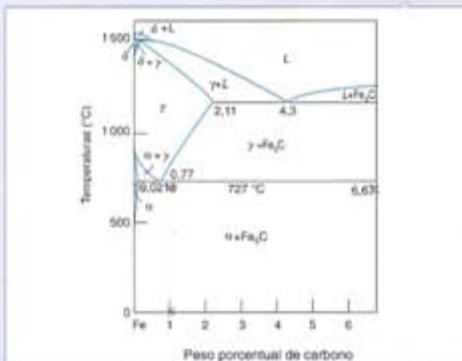
- × 21 Observa el siguiente diagrama de fases de la aleación Pb-Sn y responde a las siguientes cuestiones:



- En una aleación de composición 40 % de Sn, ¿cuál es la variación de temperatura mientras dura el proceso de solidificación?
- ¿Cuál es la composición de la aleación de punto de fusión más bajo? ¿Qué nombre recibe? ¿Qué sucede con la temperatura durante el proceso de solidificación de esta aleación?

c) Calcula el número de fases y su composición para una aleación 35 % de Sn y 65 % de Pb a las temperaturas de 150 y 250 °C.

- × 22 Calcula las cantidades relativas y composiciones de las fases en una aleación Fe-C de 1,00 % de C y 726 °C de temperatura. Utiliza el siguiente diagrama.



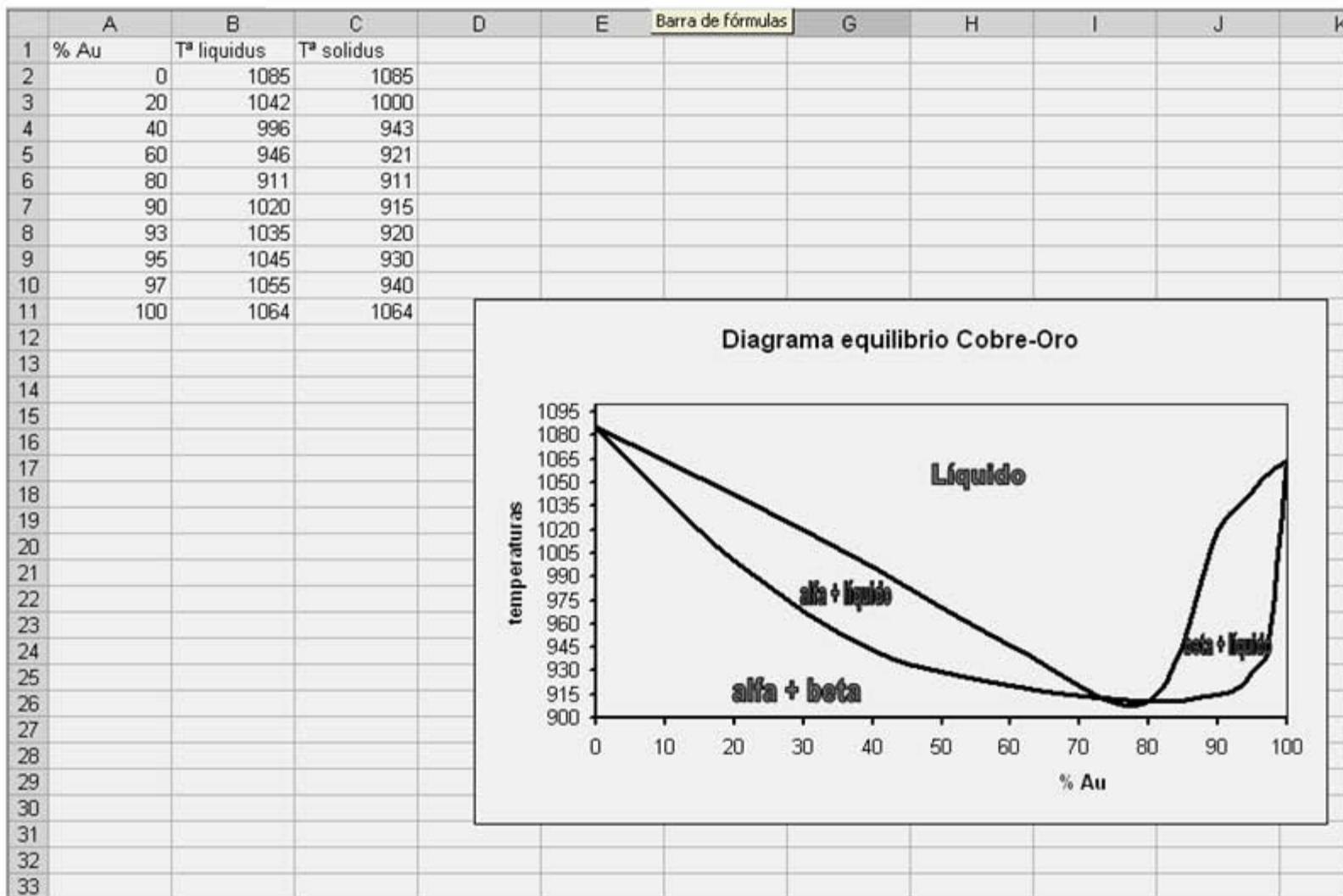
Una aleación Fe-C con el 5 % de C, ¿es hipereutéctica o hipoeutéctica? ¿Cuán es la composición del primer sólido que se forma?

- × 24 Explica el proceso de solidificación de dos aleaciones cuyo porcentaje de C es menor y mayor de 0,88 %.
- 25 Calcular la fracción de masa de ferrita y de cementita en la perlita.
- 26 En una aleación Fe-C con el 0,3 % de C, estudia su enfriamiento desde una temperatura superior a 1540 °C hasta las temperaturas ambiente explicando las fases que aparecen y los porcentajes correspondientes (utiliza el diagrama simplificado).
- 27 Igual que el ejercicio anterior pero con una composición del 3 % de C.
- × 28 Calcula las cantidades de ferrita (α) y cementita (Fe_3C) que están presentes en la perlita, sabiendo que la perlita debe contener 0,77 % de C. Utiliza el diagrama de la Actividad 25.
- 29 La fracción de masa de la ferrita y de la cementita en un acero al carbono son 0,91 y 0,09 respectivamente. Decir si se trata de un acero hipo o hipereutectoide.
- 30 Cuál es el principal componente de los aceros inoxidables, además de Fe y C? ¿Cuál es su porcentaje mínimo en la composición de la aleación?
- 31 Para un cuerpo o bloque de bomba hidráulica ¿qué fundición elegirías?

Actividad 17: diagrama cobre-oro (tipo 2)



Actividad 17: diagrama cobre-oro (tipo 2)



DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA 2015-2016

SELECTIVIDAD 2007-2011

TEMA 2: Diagramas de equilibrio

Ejercicio 1

De un lingote de una fundición gris ferrítica se extraen dos muestras, una para análisis químico y otra para su observación en el microscopio metalográfico. El análisis indica un contenido en carbono del 4 %. Suponiendo que el carbono disuelto en la ferrita a temperatura ambiente sea despreciable, se desea saber:

- ¿Qué fases se observan a temperatura ambiente en el microscopio? Dibuje un esquema aproximado de su microestructura. **(1 punto)**
- ¿Qué cantidad habría de cada una de ellas, expresada en porcentaje en peso? **(1 punto).**
- Comente las diferencias principales existentes en cuanto a propiedades mecánicas, entre una fundición gris y un acero de construcción. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 2

En un diagrama de solubilidad total de un sistema de componentes A y B, la temperatura de fusión de A es 150 °C y la de B 300 °C. Los intervalos de solidificación de las aleaciones del 20 %, 40 % y 80 % de B son: (200 °C-160 °C), (225 °C-180 °C) y (290 °C-250 °C), respectivamente.

- Dibuje el diagrama, indicando las fases presentes en cada región del mismo. **(1 punto)**
- Determine la composición y la cantidad relativa de cada una de las fases en equilibrio para la aleación del 40 % de B a la temperatura de 200 °C. **(1 punto)**
- Explique las diferencias entre resistencia mecánica y tenacidad. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 3

Un elemento A funde a la temperatura de 1000 °C, y otro B lo hace a 500 °C. En el estado líquido, ambos son completamente solubles. En el estado sólido, B es parcialmente soluble en A mientras que A es totalmente insoluble en B, formando un eutéctico a 300 °C que contiene un 50 % de A. La máxima solubilidad de B en A es del 20 % y se da a 300 °C, disminuyendo hasta el 0 % a la temperatura ambiente.

- Dibuje el Diagrama de Fases y determine la temperatura a la que empieza a solidificar una aleación con el 70 % de B, y la que tendrá cuando termine de solidificar, de acuerdo con el diagrama dibujado. **(1 punto)**
- ¿Cuáles son las fases de una aleación con el 15 % de A a la temperatura de 200 °C? ¿Qué cantidad hay de cada una? **(1 punto)**
- Indique cuándo y en qué tipo de productos estaría indicado aplicar un ensayo de defectos no destructivo. Cite, al menos, tres ensayos no destructivos. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 4

Teniendo en cuenta el diagrama hierro-carbono:

- Calcule el tanto por ciento de cementita que contiene el eutéctico. **(1 punto)**
- Calcule el tanto por ciento de ferrita que contiene el eutectoide. **(1 punto)**

c) Explique los puntos eutectoide y eutéctico e indique las transformaciones que ocurren en ellos. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 5

a) Dibuje el diagrama Fe-C simplificado, de acuerdo con los datos siguientes: **(1 punto)**:

- Temperatura eutéctica: 1143 °C. Composición del eutéctico: 4,3 % C.
- Temperatura eutectoide: 723 °C. Composición del eutectoide: 0,8 % C.
- Composición de la cementita: 6,67 % C
- Máxima solubilidad del C en la austenita: 2 % a 1143 °C.
- Temperatura de transformación del Fe (γ) en Fe (α): 910 °C.
- Solubilidad del C en el Fe α a 723 °C: 0,02 %.
- Suponga despreciable el % de carbono disuelto en la ferrita a temperatura ambiente.

b) Sobre el diagrama que ha trazado, realice un análisis de fases a 200 °C y 1,5 % C. **(1 punto)**

c) En relación con los tratamientos de metales y aleaciones, describa un tratamiento térmico superficial, explicando en qué consiste, para qué se utiliza, qué ventajas tiene y cómo se realiza. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 6

a) Dibuje un diagrama de equilibrio de dos metales (A y B) totalmente solubles en estado líquido y en estado sólido, cuyos puntos de fusión son 500 °C y 750 °C, respectivamente. A la composición del 50 %, las temperaturas de liquidus y de solidus son 700 °C y 550 °C, respectivamente. Rellene las distintas zonas del mismo. **(1 punto)**

b) En una aleación con el 60 % de B, a una temperatura en la que las fases sean una líquida y otra sólida, determine la composición de esas fases y la cantidad relativa de cada una de ellas. **(1 punto)**

c) Dibuje en un mismo gráfico de tracción las curvas correspondientes a un material muy resistente y a otro muy tenaz, indicando sus diferencias. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 7

El bismuto tiene una temperatura de fusión de 271 °C y el cadmio de 320 °C, siendo totalmente insolubles en estado sólido. Forman una eutéctica a 144 °C, que contiene 60 % de Bi. Se pide:

a) Dibuje el diagrama de equilibrio del sistema Bi-Cd, suponiendo que las líneas sean rectas. Indique las fases presentes en cada región y las líneas y los puntos notables del diagrama. **(1,25 puntos)**

b) En una aleación con 75 % de Cd, determine la composición y el porcentaje de las fases que existen a 200 °C y a temperatura ambiente, así como el de los constituyentes estructurales. **(1,25 puntos)**

Ejercicio 8

Un acero hipereutectoide presenta a temperatura ambiente un 94 % de perlita. Se pide:

a) Determinar el contenido de carbono que tendría dicho acero. **(1,25 puntos)**

b) Dibujar la microestructura que tendría e identificar sobre ella cada uno de sus constituyentes. **(1,25 puntos)**

Datos: Composición eutectoide: 0,8 %C; solubilidad del C en la ferrita: despreciable;

composición de la cementita: 6,67 %C.

Ejercicio 9

En un sistema de aleación A-B existe insolubilidad total en el estado sólido y se presenta una transformación eutéctica para una composición del 40 % de A a la temperatura de 350 °C. Si los puntos de fusión son de 500 °C para el metal A y 400 °C para el B, se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio del sistema indicando las fases existentes en cada región del mismo. Dibuje la curva de enfriamiento temperatura-tiempo desde la zona líquida hasta la temperatura ambiente (20 °C) de una aleación del 30 % de B, indicando las fases presentes en cada tramo de la curva. **(1,25 puntos)**
- Para esta misma aleación, indique las fases existentes, y calcule su porcentaje, a 351 °C. **(1,25 puntos)**

Ejercicio 10

Un acero de herramientas tiene un 1,2 % de carbono y se encuentra a una temperatura ligeramente superior a la temperatura de transformación eutectoide (723 °C). Se pide:

- Determinar las fases presentes a esa temperatura, su contenido en carbono y el porcentaje en peso de las mismas. Dibujar la microestructura a dicha temperatura señalando los constituyentes presentes. **(1,25 puntos)**
 - Si el acero anterior se enfria lentamente hasta la temperatura ambiente, determine el porcentaje de fases y dibuje su microestructura a esta temperatura. **(1,25 puntos)**
- Datos: Solubilidad despreciable del C en la ferrita a temperatura ambiente. Composición eutectoide, 0,8 % C. Composición de la cementita, 6,67 % C.

Ejercicio 11

Un elemento A funde a la temperatura de 700 °C, y otro B lo hace a 1000 °C. En el estado líquido, ambos son completamente solubles. En el estado sólido, A y B son totalmente insolubles, formando un eutéctico a 500 °C que contiene un 40 % de A. Se pide:

- Dibujar el diagrama de fases. Determinar la temperatura a la que empieza a solidificar una aleación con el 30 % de B y la que tendrá cuando termine (puede dibujar las líneas rectas). **(1,5 puntos)**
- ¿Cuáles son las fases de una aleación con el 15 % de A a 600 °C? **(1 punto)**

Ejercicio 12

Dos elementos A y B se disuelven mutuamente hasta un 10 % cada uno a 550 °C, disminuyendo la solubilidad con la temperatura. Las temperaturas de fusión son 700 °C para el A y 600 °C para el B. A 550 °C la aleación de 45 % de B solidifica formando un eutéctico. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio indicando las fases que existen en cada región. **(1,25 puntos)**
- Explicar el proceso de solidificación de la aleación eutéctica y determinar la cantidad relativa de cada fase que forma el eutéctico, a la temperatura de solidificación. **(1,25 puntos)**

Ejercicio 13

Un sistema de aleación está formado por dos metales que presentan las siguientes características: solubilidad total en el estado líquido, insolubilidad total en el estado sólido y una transformación eutéctica para el 30% de A. Si la temperatura de fusión del metal A es el doble que la de B y la temperatura eutéctica es la mitad de la de fusión del metal B, se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio, asignando las fases presentes en cada región del mismo y determine, aplicando la regla de Gibbs, los grados máximo y mínimo de libertad que podría tener dicho sistema. **(1,25 puntos)**
- Determine el porcentaje de fases presentes en una aleación del 50 % de A a temperatura ambiente. **(1,25 puntos)**

Ejercicio 14

Dos elementos, A y S, se disuelven mutuamente hasta un 10% cada uno ala temperatura de 550°C, disminuyendo la solubilidad con la temperatura. Las temperaturas de fusión son 700°C para el A y 600°C para el S. A 550°C, la aleación de 45% de S solidifica formando un eutéctico. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio indicando las fases que existen en cada región. **(1,25 puntos).**
- Determinar la composición y % de cada fase en una aleación del 30 % de S a 200° C. **(1,25 puntos)**

Ejercicio 15

Dos elementos, A y B, completamente solubles en el estado líquido, funden a las temperaturas de 500°C y 700°C, respectivamente. En el estado sólido, A y B son parcialmente solubles el uno en el otro formando un eutéctico a la composición del 25 % de A a 400°C. La máxima solubilidad de B en A y de A en B es del 10 % y se da a 400°C, disminuyendo hasta el 0 % a la temperatura ambiente. Se pide:

- Dibuje el Diagrama de Fases y trace la curva de enfriamiento de una aleación con el 75 %de B. **(1,25 puntos)**
- ¿Cuáles son las fases presentes en una aleación con el 15 % de A a 200°C? ¿Qué composición tienen? **(1,25 puntos)**

Ejercicio 16

Dos metales A y B cuyas temperaturas de fusión son 900°C y 1000°C respectivamente, forman un eutéctico a 700 °C con el 70 % de B. Las solubilidades mutuas máximas en el eutéctico son del 10% y disminuyen con la temperatura hasta ser nulas a la temperatura ambiente. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio incluyendo las fases presentes en cada región. **(1 punto)**
- Calcular los porcentajes y composición de las fases presentes a la temperatura ambiente en una aleación del 40 %de A. **(1 punto)**
- Explicar la varianza o grados de libertad de un sistema. Ponga algún ejemplo relativo al diagrama dibujado. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 17

Un acero de herramientas contiene un 93,18 % de perlita y un 6,82 % de cementita, cantidades expresadas en porcentaje másico. Se pide:

- Determinar el contenido en carbono del acero. **(1 punto)**
- Dibujar un esquema de su microestructura a temperatura ambiente señalando cada microconstituyente. **(1 punto)**

Datos: Composición eutectoide 0,8 % C, composición de la cementita 6,67 % C.

- Explicar en qué consistiría un tratamiento de temple en dicho acero. Cómo lo realizaría. Comente los cambios que produciría el tratamiento en su microestructura final y en sus propiedades. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 18

Dos metales A y B cuyas temperaturas de fusión son 900 °C y 1000 °C respectivamente, forman un eutéctico a 700 °C con el 70 % de B. Las solubilidades mutuas máximas en el eutéctico son del 10 % y disminuyen con la temperatura hasta ser nulas a la temperatura ambiente. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio incluyendo las fases presentes en cada región. **(1 punto)**
- Calcular los porcentajes y composición de las fases presentes a la temperatura ambiente en una aleación del 40 % de A. **(1 punto)**
- Explicar la varianza o grados de libertad de un sistema. Ponga algún ejemplo relativo al diagrama dibujado. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 19

En un acero de 0,5 % C, determinar:

- El % de austenita a la temperatura justo por encima de la línea eutectoide. **(1 punto)**
- El % de ferrita a la misma temperatura, y a 500 °C, considerando que el contenido en carbono de la ferrita es cero. **(1 punto)**

Datos: composición eutectoide, 0,8 %C. Solubilidad del C en la ferrita a temperatura eutectoide, 0,025 %.

- Explique el fenómeno de la fluencia en los aceros. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 20

Dos elementos A y B se disuelven mutuamente hasta un 10 % cada uno. La aleación de 45 % de B solidifica formando un eutéctico. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio indicando las fases que existen en cada región. **(1 punto)**
- Determinar la cantidad relativa de cada fase en el eutéctico, a la temperatura de solidificación. **(1 punto)**
- Explicar en qué consisten los tratamientos mecánicos. Ponga algunos ejemplos. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 21

Teniendo en cuenta el diagrama hierro-carbono, se pide:

- Determinar el tanto por ciento de cementita que contiene el eutéctico al formarse. **(1 punto)**
 - Determinar el tanto por ciento de ferrita que contiene el eutectoide al formarse. **(1 punto)**
- Datos: composición eutectoide 0,8 % C, composición eutéctica 4,3 % C, composición de la cementita 6,67 % C, solubilidad del C en la austenita a la temperatura eutéctica 2 % y solubilidad del C en la ferrita a la temperatura eutectoide 0,025 %.
- Explique dos ensayos de dureza. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 22

En un diagrama de solubilidad total de un sistema de componentes A y B, la temperatura de fusión de A es 150 °C y la de B 300 °C. Si los intervalos de solidificación de las aleaciones del 20 %, 40 % y 80 % de B son, respectivamente, (200 °C - 160 °C), (225 °C - 180 °C) y (290 °C - 250 °C), se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio asignando las fases presentes en cada región del mismo. **(1 punto)**
- Determinar la composición de las fases en equilibrio para la aleación del 40 % de B y la cantidad relativa de cada fase a la temperatura de 200 °C. **(1 punto)**
- Explicar las propiedades que se modifican en un temple y en un recocido. **(0,5 puntos)**

SELECTIVIDAD 2012 y 2013**Ejercicio 23**

Dos metales A y B son completamente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.

La temperatura de fusión del metal A es de 900 °C y la del B de 700 °C. La aleación del 40% de B solidifica a 400 °C, formando un eutéctico. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio indicando las fases que existen en cada región. **(1 punto)**
- Determinar la cantidad de eutéctico de una aleación del 20% de B a temperatura ambiente. **(1 punto)**
- ¿Que propiedades mecánicas aumentan y disminuyen en un tratamiento de temple? ¿Cómo se realiza en la práctica? **(0,5 puntos)**

Ejercicio 24

Suponga los siguientes datos del diagrama Fe-C: composición del eutectoide: 0,8 % de carbono, composición de la ferrita a temperatura eutectoide: 0,025 % de carbono, concentración de carbono en la ferrita a temperatura ambiente: despreciable. Para un acero de 0,5 %C, se pide:

- Determinar el % de austenita a la temperatura justo por encima del eutectoide. **(1 punto)**
- Determinar el % de ferrita a la temperatura eutectoide y a la temperatura ambiente. **(1 punto)**
- Diferencias entre los tratamientos térmicos de temple y revenido. Cómo afectan a las propiedades mecánicas del acero. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 25

Dos metales A y B, cuyas temperaturas de fusión son 700 °C y 300 °C respectivamente, forman un sistema de aleaciones completamente solubles en estado líquido y en estado sólido. Sabiendo que las aleaciones de 20 %, 50 % y 80 % de B, comienzan su fusión a las temperaturas de 550 °C, 400 °C y 320°C respectivamente y terminan a las temperaturas de 650 °C, 550 °C y 420 °C respectivamente, se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio indicando las fases presentes en cada región. **(1 punto)**
- Determinar, a la temperatura de 400 °C, la composición y las cantidades relativas de las fases en equilibrio para una aleación de 70 % de B. **(1 punto)**
- Enunciar la regla de las fases de Gibbs y explicar el significado de cada término. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 26

Considere los siguientes datos del diagrama Fe-C: Solubilidad del C en la ferrita a temperatura eutectoide: 0,025%. Solubilidad del C en la ferrita a temperatura ambiente: despreciable. Composición eutectoide: 0,8 % C. Composición de la cementita: 6,67 % C. Se pide:

- Determinar el porcentaje de carbono a temperatura ambiente, de un acero hipoeutectoide constituido por un 40 % de ferrita y 60 % de perlita. **(1 punto)**
- Calcular las cantidades relativas de ferrita y cementita presentes en la perlita a temperatura ambiente. **(1 punto)**
- Establecer al menos dos diferencias entre aceros y fundiciones. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 27

Dos metales A y B son solubles en estado líquido y se disuelven parcialmente en estado sólido. El metal A disuelve un máximo de 5 % de B y el metal B disuelve un máximo de 10 % de A, ambos a la temperatura de 400 °C. Las solubilidades disminuyen con la temperatura hasta temperatura ambiente. Las temperaturas de fusión son 700 °C para el A y 500 °C para el B. A 400 °C la aleación de 30 % de B solidifica formando un eutéctico. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio indicando las fases que existen en cada región. **(1 punto)**
- Determinar la cantidad relativa de cada fase que forma el eutéctico a 350 °C. **(1 punto)**

- c) ¿Qué características tiene una aleación eutéctica en relación con la solidificación?
(0,5 puntos)

Ejercicio 28

Un acero de herramientas tiene un 1,2% de carbono y se encuentra a una temperatura ligeramente superior a la temperatura de transformación eutectoide. Datos: Solubilidad despreciable del C en la ferrita a temperatura ambiente. Composición eutectoide, 0,8% C. Composición de la cementita, 6,67% C. Se pide:

- Determinar las fases presentes a esa temperatura, su contenido en carbono y el porcentaje en peso de las mismas.**(1 punto)**
- Si el acero anterior se enfriá lentamente hasta la temperatura ambiente, determinar el porcentaje de fases y dibujar su microestructura. **(1 punto)**
- Definir: Resistencia a la rotura, estricción y alargamiento a la rotura. **(0,5 puntos)**

Ejercicio 29

Dos metales A y B solidifican a 1000 °C y 500 °C respectivamente y presentan solubilidad total tanto en estado sólido como líquido. Una aleación de 30 % de B es totalmente líquida por encima de 850 °C y sólida por debajo de 650 °C. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio indicando las fases presentes en cada región. Dibujar la curva de enfriamiento para una aleación de 30 % de B **(1 punto)**.
- Se dispone de 5 kg una aleación de 30 % de B a 750 °C. La concentración en la línea de líquidos es de 42 % de B y en la de sólidos de 10 % de B. Determinar la masa de sólido y líquido de la aleación a esa temperatura **(1 punto)**.
- Describir el principio de funcionamiento de un transductor de presión piezoelectrónico. Indicar algunos ejemplos de su utilización **(0,5 puntos)**.

Ejercicio 30

Sabiendo del diagrama hierro-carbono, que la composición de la cementita es de 6,67 %C, la del eutectoide 0,8 %C, la de la austenita 2 %C (a la temperatura eutéctica), la de la ferrita 0,02 %C y la del eutéctico 4,3 %C. Se pide:

- Determinar el tanto por ciento de cementita que contiene el eutéctico **(0,75 puntos)**.
- Determinar el tanto por ciento de ferrita que contiene el eutectoide **(0,75 puntos)**.
- Explicar las transformaciones eutectoide y eutéctica, así como los grados de libertad del sistema en esos puntos **(1 punto)**.

Ejercicio 31

Las temperaturas de fusión del bismuto y el cadmio son 271 °C y 320 °C, respectivamente. Ambos son totalmente insolubles en estado sólido y forman un eutéctico a 144 °C de 60 % de Bi. Se pide:

- Dibujar el diagrama de equilibrio del sistema Bi-Cd, suponiendo que las líneas de equilibrio son rectas. Indique las fases y las regiones, líneas y puntos notables del diagrama **(1 punto)**.
- Determinar para una aleación de 75 % de Cd, el porcentaje de las fases que existen a temperatura ambiente **(1 punto)**.
- Definir los siguientes conceptos: límite elástico, módulo de elasticidad y resistencia a la tracción **(0,5 puntos)**.

Ejercicio 32

Dos metales A y B presentan solubilidad total en estado líquido e insolubilidad total en estado sólido. Sabiendo que la temperatura de fusión del metal A es de 900 °C, la del metal B de 800 °C, la temperatura del eutéctico 500 °C con un porcentaje del 40 % en A, se pide:

- a) Dibujar el diagrama de equilibrio, asignando las fases presentes en cada región del mismo **(1 punto)**.
- b) Para una aleación del 80 % de A, dibujar la curva de enfriamiento y determinar la composición de las fases presentes a 600 °C **(1 punto)**.
- c) Describir los siguientes constituyentes de los aceros: austenita y perlita **(0,5 puntos)**.