



Los metales puros no se utilizan de forma generalizada en la industria, debido a su alto coste de obtención y a que muchas de sus propiedades mecánicas no cumplen con los requisitos técnicos. Se recurre a ellos cuando se quieren aprovechar propiedades como la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión.

En lugar de utilizar metales puros se emplean aleaciones de dos o más metales en las que, en algunos casos, al añadir una pequeña cantidad de un elemento no metálico como el carbono, las propiedades mecánicas como la resistencia, la dureza, la tenacidad, etc., aumentan de forma significativa.

## 2.1. CONCEPTO DE ALEACIÓN

Se denomina aleación a la sustancia que se obtiene mediante la fusión y posterior solidificación de una mezcla de dos o más elementos, siempre que el conjunto conserve las propiedades metálicas en estado sólido. En función de los elementos que las forman, podemos clasificar las aleaciones en **metálicas**, cuando todos los elementos son metales, y **no metálicas**, cuando alguno de los elementos es un no metal.

En las aleaciones se distinguen **disolvente** y **soluto** en función de las siguientes variables:

- Si los dos metales cristalizan en el mismo sistema cristalino, el disolvente será el que está en mayor proporción y el soluto el que se encuentra en menor proporción.
- Si los dos metales cristalizan en distinto sistema cristalino, el disolvente es aquel metal que conserva la red cristalina y el soluto el que no la mantiene.

## 2.2 ESTRUCTURA CRISTALINA DE LAS ALEACIONES

La estructura cristalina de las aleaciones viene determinada por las interrelaciones entre los átomos de los elementos que intervienen en ellas. En las aleaciones binarias puede suceder:

**A. Que los dos metales, A y B, sean solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido.** En este caso la estructura cristalina de la aleación será una mezcla mecánica, formándose cristales de A y B por separado.

**B. Que los dos metales A y B sean solubles en estado líquido y en estado sólido.** En este caso la estructura cristalina de la aleación será una disolución sólida formada por granos homogéneos. Las soluciones

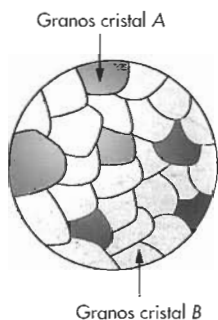


Fig. 1. Mezcla mecánica.

sólidas se producen cuando los átomos del metal que se disuelve quedan integrados en la red cristalina del metal que no se disuelve. Existen dos tipos de disoluciones sólidas:

- **Soluciones sólidas por sustitución.** Sean dos metales donde *A* y *B* representan los átomos de ambos. Los átomos de *B* se disuelven, mediante sustitución de *B* por *A*, y forman una sola estructura cristalina. El valor del radio atómico de *B* debe ser similar o muy próximo al de *A*.
- **Soluciones sólidas por inserción.** Sean dos metales, donde *C* y *D* representan los átomos de ambos. Los átomos de *C* se disuelven, por inserción en los espacios interatómicos, en la red cristalina de *D* y forman una sola estructura cristalina. El radio atómico de *D* debe ser bastante menor que el de *C*.

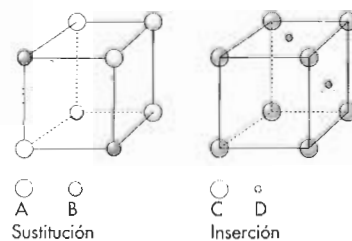


Fig. 2. Formación de soluciones sólidas por sustitución y por inserción.

**C. Que los dos metales sean solubles en estado líquido y parcialmente solubles en estado sólido.** En este caso, la estructura cristalina será una mezcla mecánica formada por dos soluciones sólidas, que designaremos con las letras griegas  $\alpha$  y  $\beta$ . Las soluciones sólidas  $\alpha$  y  $\beta$  pueden formarse por sustitución o por inserción.

**D. Que los dos elementos A y B reaccionen químicamente.** En este caso, la relación entre los átomos de cada elemento concuerda con una proporción estequiométrica, la cual se puede expresar por una fórmula sencilla  $A_m B_n$ .

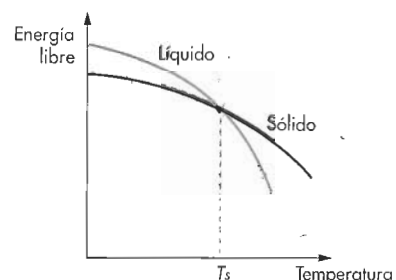


Fig. 3. Variación de la energía libre con la temperatura.

### 2.3 EL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN

El proceso de cristalización se produce cuando una sustancia pasa de estado líquido a estado sólido; es decir, cuando cambia su estado de agregación. Para que se produzca la cristalización es necesario que el proceso vaya acompañado de una disminución de energía libre.

En la figura 3 se muestra de forma esquemática la variación de la energía libre de la sustancia en los estados sólido y líquido. La temperatura  $T_s$  es la temperatura de equilibrio; es decir, es el valor de temperatura en el que coinciden, para esa sustancia, los valores de energía libre en ambos estados. Por tanto, observando la figura, se puede comprobar que:

- Para valores de la temperatura menores que  $T_s$  es más estable el estado sólido.
- Para valores de la temperatura mayores que  $T_s$  es más estable el estado líquido.

Y, por ello, para comenzar la cristalización es necesario que la temperatura sea algo inferior a  $T_s$ .

El proceso de cristalización se puede observar en la figura 4 y consta de tres etapas:

- a) Formación de los centros de cristalización.
- b) Crecimiento dendrítico.
- c) Formación de los granos.

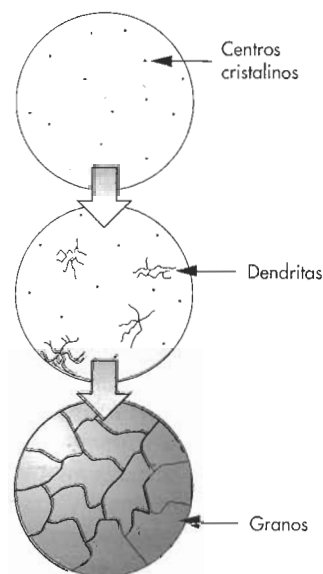


Fig. 4. Proceso de cristalización.

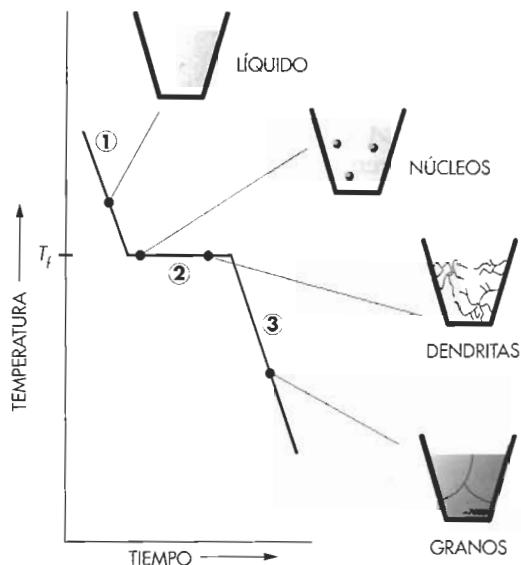


Fig. 5. Curva de enfriamiento de un elemento puro.

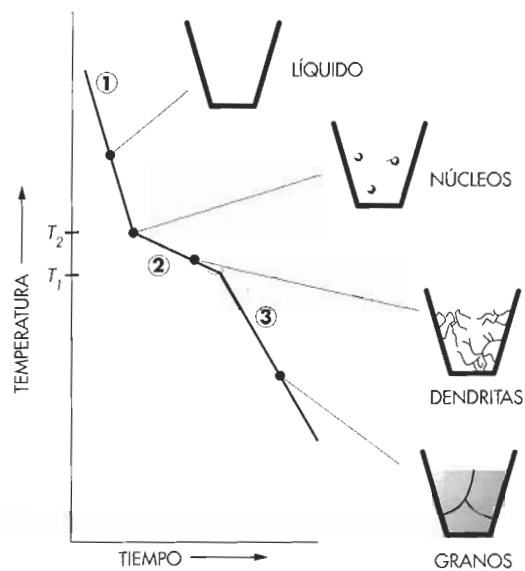


Fig. 6. Curva de enfriamiento de una aleación.

## 2.4 CURVAS DE ENFRIAMIENTO

Si un sistema cualquiera se encuentra a una temperatura  $T_1$  y lo enfriamos hasta la temperatura  $T_2$ , la variación de temperatura con el tiempo,  $t$ , viene definida por la ecuación de Newton:

$$T = T_2 + (T_1 - T_2) \cdot e^{-k \cdot t}$$

siendo  $k$ , una constante que depende del medio y del sistema.

Si durante el enfriamiento se produce alguna transformación en los estados de agregación del sistema, este cambio tiene que ir acompañado de un desprendimiento de calor. Los cambios de estado en las curvas de enfriamiento se traducen en la gráfica en una variación de la pendiente de la curva de enfriamiento.

En la curva de enfriamiento de elementos puros (Fig. 5), la gráfica presenta un tramo horizontal, de pendiente cero, que indica que el cambio de estado se produce a una temperatura fija (tramo 2).

En la curva de enfriamiento de una aleación (Fig. 6), la solidificación se produce en un intervalo de temperaturas (representado por la recta oblicua 2), y por tanto, existe un cambio de pendiente entre los tramos 1 (aleación líquida) y 3 (aleación sólida).

## 2.5 DIAGRAMAS DE FASES O DE EQUILIBRIO

El diagrama de fases es una representación gráfica del estado de una aleación. Si varían la composición de la aleación, su temperatura y su presión, el estado de la aleación también cambia; estos cambios vienen reflejados en la gráfica (Fig. 7).

### Curva de enfriamiento

Representa el descenso de la temperatura en función del tiempo, que experimentan, respectivamente, los metales puros y las aleaciones, cuando los sometemos a un enfriamiento desde el estado líquido al estado sólido, a la temperatura ambiente.

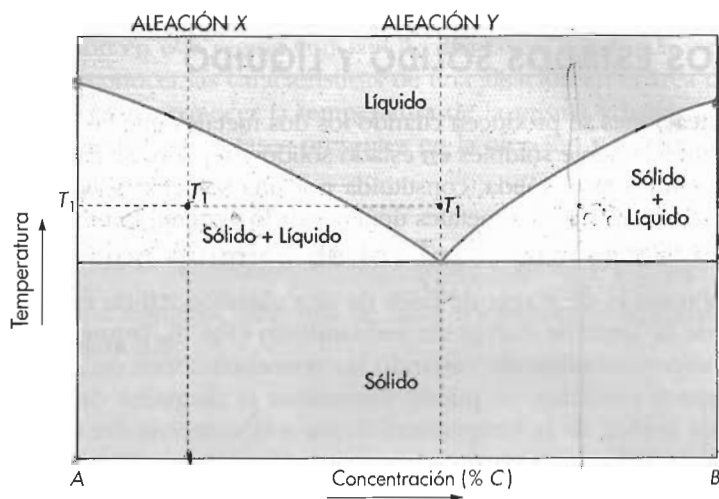


Fig. 7. Diagrama de fases.

Sea una aleación de componentes *A* y *B*. Como puede apreciarse en el diagrama:

- Una aleación *X* tendrá diferentes estados en función de la temperatura a la que se encuentre
- Diferentes aleaciones, *X* e *Y*, a una misma temperatura, pueden encontrarse en estados distintos. Consideremos una aleación *X* a la temperatura  $T_1$ . La aleación tendrá dos estados, sólido y líquido; en cambio, una aleación *Y* a la misma temperatura estará únicamente en estado líquido.

El diagrama de fases muestra los estados estables, es decir, los estados que en unas condiciones dadas, poseen el mínimo de energía libre.

## Ley de Gibbs o Regla de las fases

Es la relación entre el número de fases, el número de componentes, y las variables (grados de libertad) de un sistema heterogéneo en equilibrio. Matemáticamente se expresa:

$$F + L = C + 2$$

Y se puede enunciar diciendo: En todo equilibrio, la suma de las fases del sistema, más los grados de libertad, es igual al número de componentes más dos.

**Fase (*F*).** Se denomina fase a la parte homogénea de un sistema, separada de las demás partes de este por una superficie. El valor de *F* indica el número de fases que existen en el sistema.

**Componentes (*C*).** Son los elementos o sustancias que forman el sistema. Por tanto, un metal puro será un sistema de un solo componente, y una aleación de dos metales será un sistema de dos componentes. Los compuestos químicos se consideran un solo componente si no se disocian.

**Grados de libertad (*L*).** Es el número de factores externos e internos (temperatura, presión y concentración) que pueden cambiarse sin variar el número de fases del sistema.

## Sistemas heterogéneos

*Un sistema es heterogéneo cuando sus componentes se pueden separar por medios físicos. Los componentes de un sistema heterogéneo están todos en las mismas condiciones de presión y temperatura.*

## 2.6 ALEACIONES CON SOLUBILIDAD TOTAL EN LOS ESTADOS SÓLIDO Y LÍQUIDO

Estas aleaciones se producen cuando los dos metales que las componen son completamente solubles en estado sólido y líquido. Se forma entonces una única fase, sólida, constituida por una solución sólida formada por sustitución. Los dos metales tienen, por lo general, la misma estructura cristalina.

Para obtener el diagrama de fases de una aleación  $AB$  de este tipo, se parte de la serie de curvas de enfriamiento (Fig. 8, izquierda), obtenidas experimentalmente variando las concentraciones de  $A$  y  $B$ . Con estos datos parciales, se puede determinar el diagrama de fases real con una gráfica de la temperatura frente a la composición (Fig. 8, derecha). Este diagrama de fases consta de dos puntos ( $T_A$  y  $T_B$ ), dos líneas y tres áreas.

Los puntos  $T_A$  y  $T_B$  representan los puntos de solidificación de los metales puros. La curva obtenida al unir los puntos que indican el comienzo de la solidificación se denomina línea de *liquidus*, en tanto que la curva inferior que muestra el final de la misma, se denomina línea de *solidus*.

El área que se encuentra por encima de la curva de *liquidus* es una región unifásica, y cualquier aleación en esta región consistirá en una solución líquida homogénea.

El área por debajo de la línea de *solidus* es una región unifásica y cualquier aleación en esta región consistirá en una solución sólida homogénea.

Es costumbre designar mediante letras griegas a las soluciones sólidas (terminales o intermedias); en este caso con la letra  $\alpha$ .

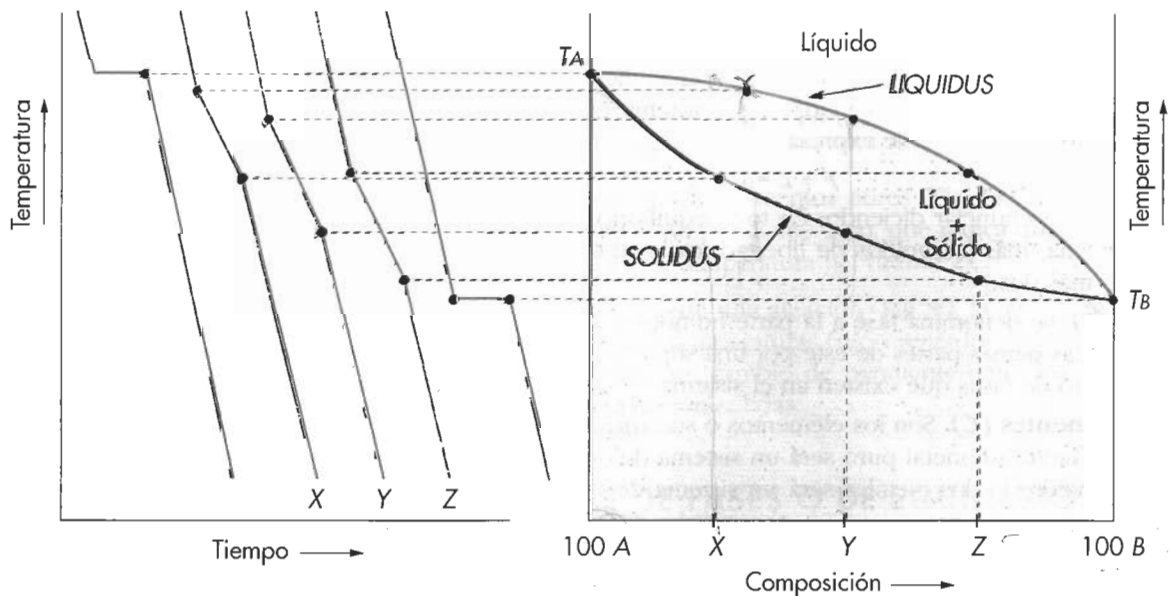


Fig. 8. Obtención del diagrama de fases de una aleación  $AB$  con solubilidad total en los estados sólido y líquido.

Entre las líneas de *liquidus* y *solidus* existe una región bifásica, y cualquier aleación en esta región constará de dos fases, una sólida y otra líquida. Para conocer las características de una aleación en el área de dos fases es necesario conocer la temperatura de la misma y hallar la composición química de las fases presentes en la aleación y sus cantidades relativas.

## Composición química de las fases presentes

Analicemos el siguiente diagrama de fases correspondiente a una aleación cualquiera *AB*:

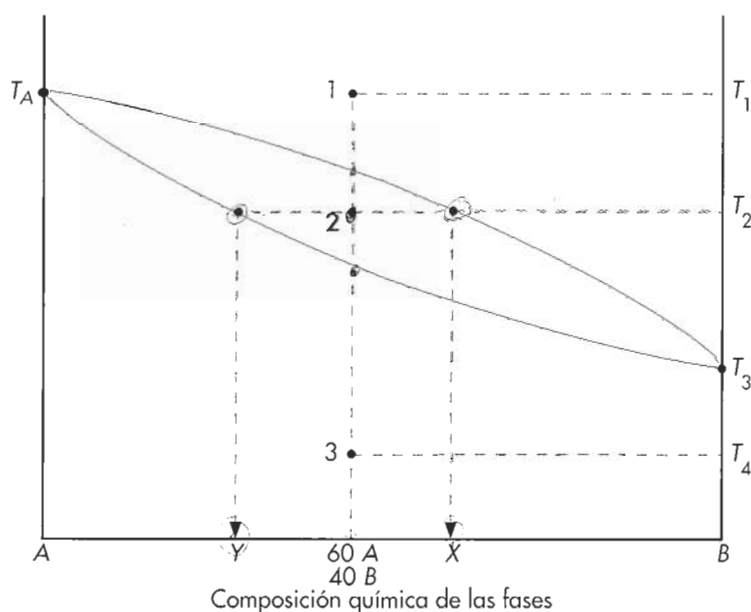


Fig. 9. Determinación de la composición química a partir del diagrama de fases.

En este diagrama:

- **Punto 1:** una sola fase (solución líquida homogénea) de composición química 60A 40B.
- **Punto 2:** dos fases (líquida y sólida) de composición química: líquido  $X$  ( $A\%$ ,  $B\%$ ); sólido  $Y$  ( $A\%$ ,  $B\%$ ).
- **Punto 3:** una sola fase (solución sólida homogénea) de composición química 60A 40B.

Para determinar la composición química de las fases en una región bifásica, se traza una línea horizontal para la temperatura considerada, llamada "línea de vínculo o coexistencia", hasta la intersección con las líneas de *liquidus* y *solidus*. La proyección de los puntos de corte sobre el eje de abscisas permite leer directamente las composiciones de cada fase.

## Cantidades relativas de las fases presentes

Para determinar las cantidades relativas de cada fase, a una temperatura determinada, en una región bifásica, se utiliza la denominada **regla de la palanca**.

Consiste en trazar una línea vertical, que representa la aleación en estudio, y una horizontal, que representa la temperatura. La línea vertical divide a la horizontal en dos partes cuyas longitudes son inversamente proporcionales a la cantidad de las fases presentes:

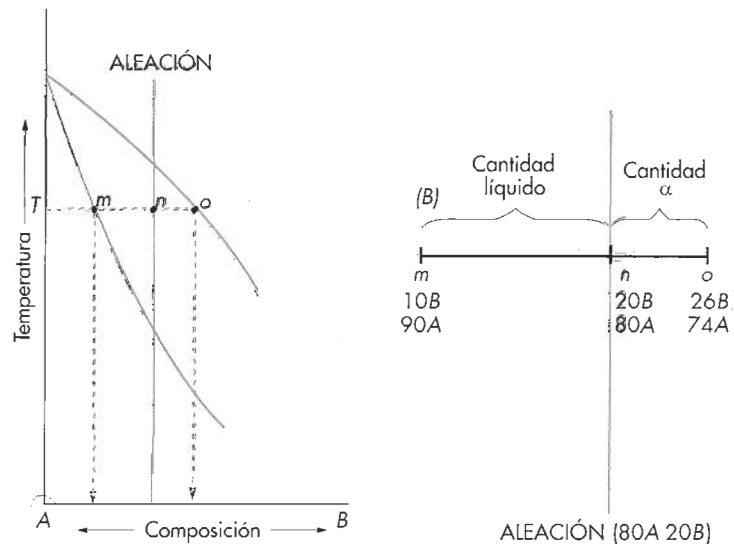


Fig. 10. Regla de la palanca

La línea de coexistencia queda dividida en dos partes,  $mn$  y  $no$  (Fig. 10, derecha). Si  $mo$  representa el 100% del peso total de las dos fases a la temperatura  $T$ , la regla de la palanca se expresa matemáticamente como:

$$\text{Líquido (\%)} = \frac{mn}{mo} \cdot 100$$

$$(\alpha) \text{ Sólido (\%)} = \frac{no}{mo} \cdot 100$$

Si utilizamos las composiciones referidas a uno de los componentes, por ejemplo  $B$ , tal como indica la figura anterior, tendremos:

$$\text{Líquido (\%)} = \frac{10}{16} \cdot 100 = 62,5\%$$

$$(\alpha) \text{ Sólido (\%)} = \frac{6}{16} \cdot 100 = 37,5\%$$

Lo que indica que una aleación de composición 80A 20B consta de dos fases a la temperatura  $T$ : una líquida de composición 74A 26B, que constituye el 62,5% de todo el material, y la otra sólida de composición 90A 10B, que comprende el 37,5% de todo el material presente.



Fig. 11. Microestructura de una aleación de cuproníquel de composición 70Cu 30Ni, en estado sólido.

## Proceso de cristalización por enfriamiento en equilibrio

El enfriamiento lento de una aleación, bajo condiciones de equilibrio, se estudia para observar los cambios de fase y la microestructura final a temperatura ambiente. En la figura inferior podemos seguir el enfriamiento de una aleación de composición (57A 43B).

Como puede observarse, a la temperatura  $T_4$  solidifica el último líquido, muy rico en el componente B, y lo hace en las fronteras de grano. Ahora bien, la difusión se encargará de que la composición final de todos los granos sea uniforme.

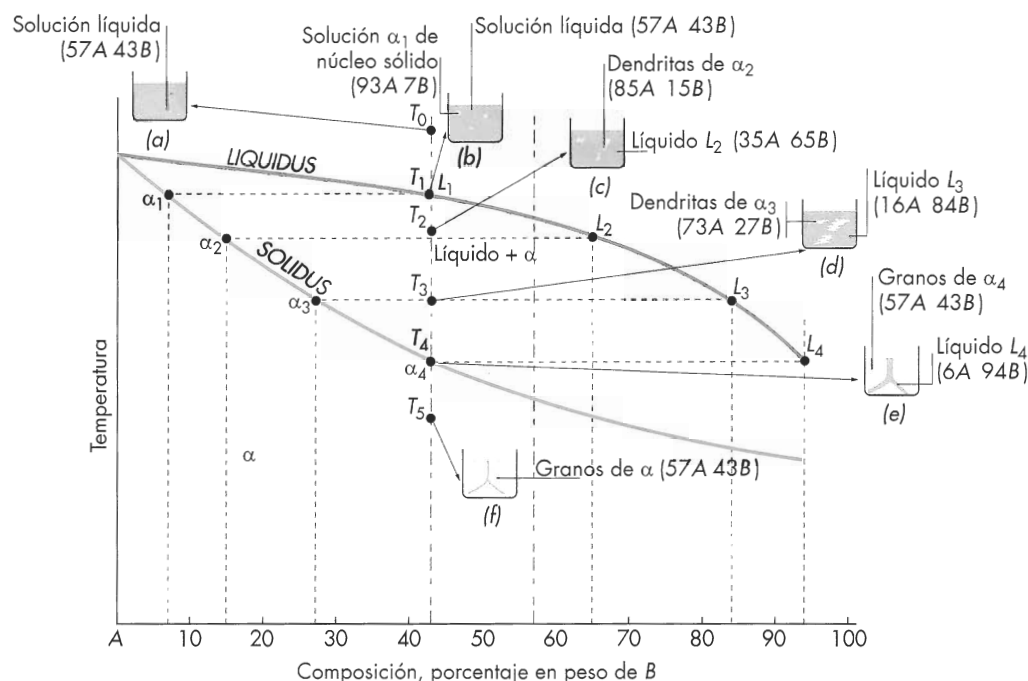


Fig. 12. Enfriamiento lento de una aleación AB con solubilidad total en los estados sólido y líquido en condiciones de equilibrio.

## 2.7 ALEACIONES CON SOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO LÍQUIDO E INSOLUBILIDAD EN ESTADO SÓLIDO

Estas aleaciones se producen cuando los dos metales son totalmente insolubles entre sí en estado sólido, o cuando su solubilidad es tan restringida que pueden considerarse como insolubles.

Para obtener el diagrama de fases de una aleación AB de este tipo, se parte igualmente de una serie de curvas de enfriamiento, obtenidas experimentalmente, y que en este caso muestran diferente comportamiento.



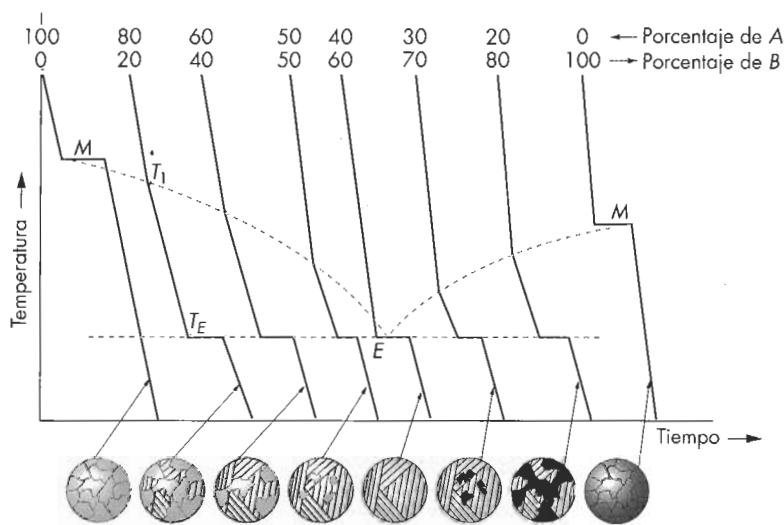


Fig. 13. Curvas de enfriamiento y microestructuras a temperatura ambiente.

Nótese que existe una curva de enfriamiento que muestra la solidificación a una temperatura constante, que es además la más baja de la serie. Esta aleación se denomina **eutéctica**, y la temperatura, **temperatura eutéctica**. Aun cuando la solidificación de esta aleación se parece a la de un metal puro, no es una aleación de fusión congruente, ya que el sólido está constituido por dos fases.

El diagrama de fases se puede dibujar representando gráficamente la temperatura frente a la composición.

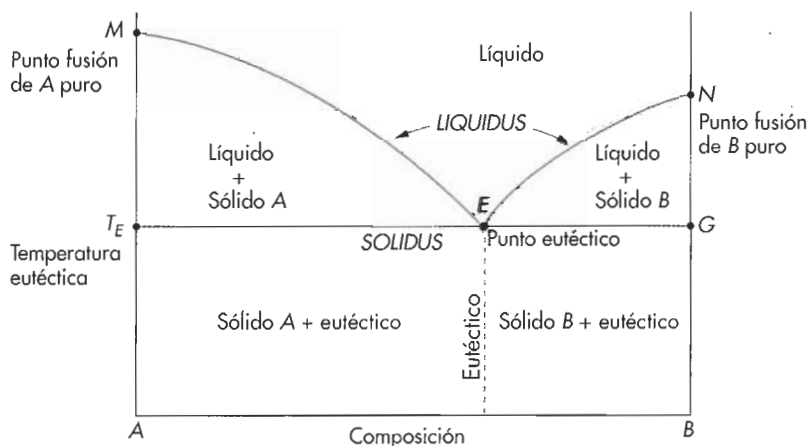


Fig. 14. Diagrama de fases de una aleación AB con solubilidad total en estado líquido e insolubilidad en estado sólido.

Es práctica común considerar las aleaciones a la izquierda del eutéctico como **hipoeutécticas**, y a la derecha como **hipereutécticas**.

La gráfica, además, está dividida en cuatro áreas que determinan las fases. Para establecerlas, basta trazar una línea y considerar su intersección con las líneas de *liquidus* y *solidus*.

## Enfriamiento en equilibrio

Consideramos las aleaciones del siguiente diagrama:

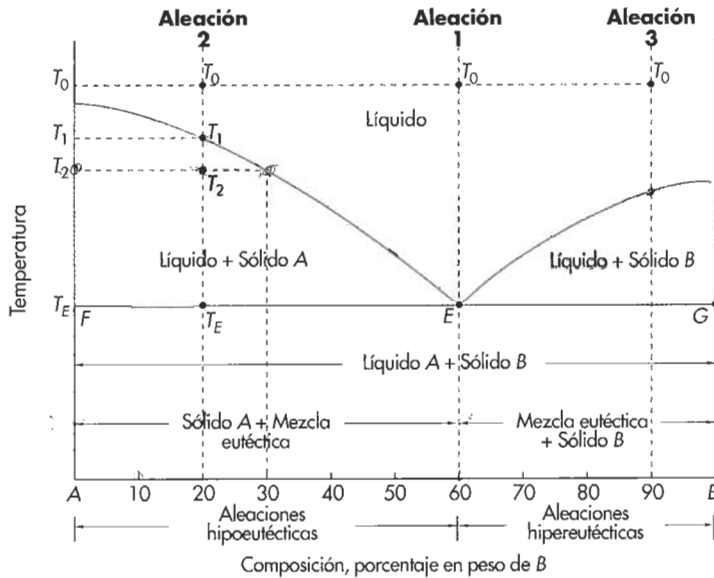


Fig. 15. Enfriamiento de tres aleaciones AB con solubilidad total en estado líquido e insolubilidad en estado sólido.

**Aleación 1.** Es la composición eutéctica. Se enfría desde  $T_0$  hasta  $T_E$  intervalo en el cual la aleación es una mezcla líquida homogénea. Al llegar a  $T_E$  como esta es la intersección de la curva de *liquidus* y *solidus*, comienza y termina la solidificación a temperatura constante, dando lugar a una mezcla de dos fases, sólido A (punto F) y sólido B (punto G). Resulta así una mezcla muy fina de granos de A y B puros, que se conoce como **mezcla eutéctica**. El cambio de este líquido de composición E en dos sólidos a temperatura constante se conoce como **reacción eutéctica**.

**Aleación 2.** Es una aleación hipoeutéctica, conserva una solución líquida hasta  $T_1$  y a partir de este momento empieza a solidificar sólido A puro, aumentando la concentración de B en el líquido. En  $T_2$ , el sólido continúa siendo A puro y el líquido está enriquecido en B, y así sucesivamente hasta llegar a  $T_E$ . La cantidad relativa de cada fase y a cada temperatura puede determinarse mediante la regla de la palanca. Cuando llegamos al punto  $T_E$ , el líquido sufre la reacción eutéctica solidificando la mezcla eutéctica (A+B).

Así pues, todas las aleaciones hipoeutécticas, una vez solidificadas, constarán de A **primario** o **proeutéctico** (se forma entre  $T_1$  y  $T_E$ ) y mezcla eutéctica. Cuanto más cerca del punto eutéctico se encuentre la aleación, mayor será el porcentaje de mezcla eutéctica presente en la misma.

**Aleación 3.** Aleación hipereutéctica; seguirá el mismo proceso descrito anteriormente, si bien en este caso el resultado será una aleación compuesta de sólido B + mezcla eutéctica.

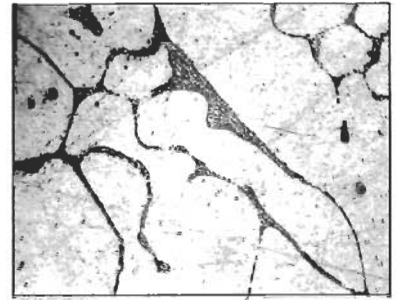


Fig. 16. Mezcla eutéctica.

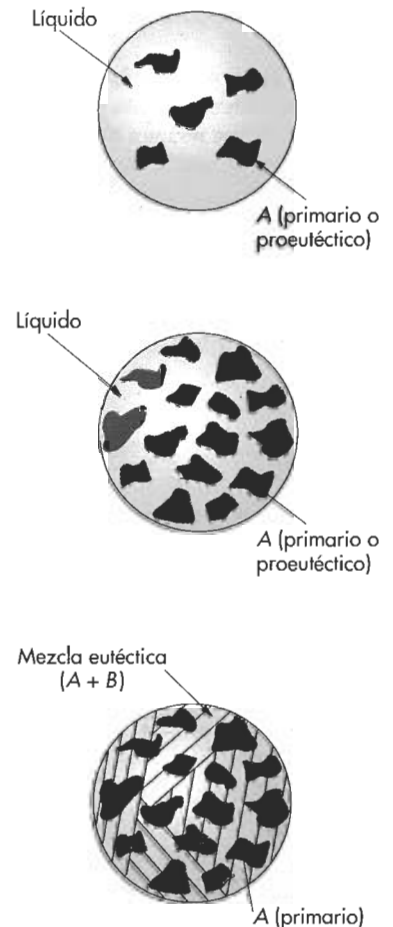


Fig. 17. Microestructuras.

## 2.8 ALEACIONES CON SOLUBILIDAD TOTAL EN ESTADO LÍQUIDO Y SOLUBILIDAD PARCIAL EN ESTADO SÓLIDO

La mayoría de los metales muestran alguna solubilidad de uno en otro en el estado sólido; este tipo es el más frecuente y por tanto el sistema de aleación más importante.

Igual que en los casos anteriores, el diagrama de fases se obtiene de las curvas de enfriamiento.

Los puntos de fusión de los metales puros son  $T_A$  y  $T_B$ . La línea de *líquidus* se forma al unir los puntos  $T_A$ ,  $E$  y  $T_B$ . La de *solidus* al unir  $T_A$ ,  $F$ ,  $E$ ,  $G$  y  $T_B$ . Las fases existentes en cada región están indicadas en la gráfica:

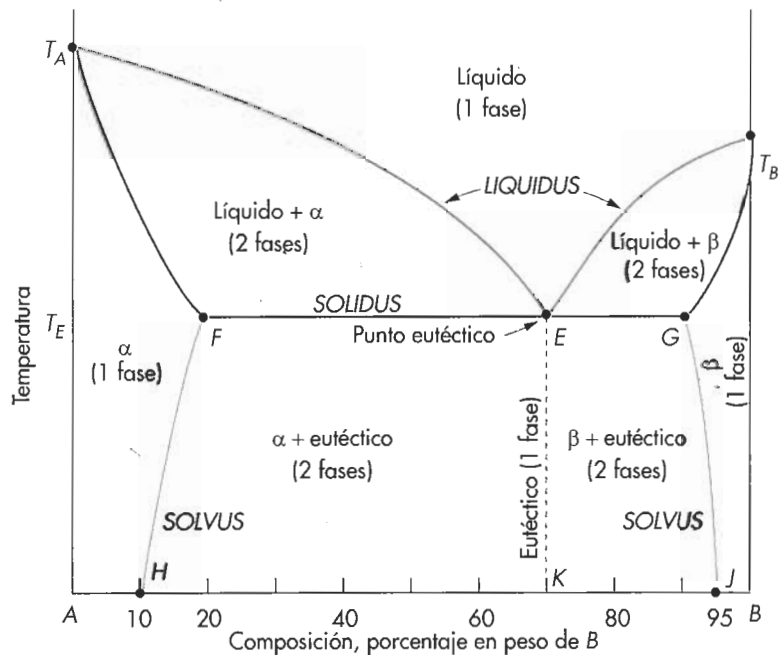


Fig. 18. Diagrama de fases de una aleación AB con solubilidad total en estado líquido y solubilidad parcial en estado sólido.

Se observa en el diagrama que nunca cristalizan A y B puros, sino en forma de soluciones ( $\alpha$  y  $\beta$ ) de una sola fase. Estas soluciones limitadas por los ejes, se denominan **soluciones sólidas terminales**.

En la gráfica anterior aparecen unas curvas nuevas denominadas *solvus*, que indican las solubilidades máximas de B en A (solución  $\alpha$ ) o de A en B (solución  $\beta$ ), en función de la temperatura. Al descender la temperatura, desciende la solubilidad.

La línea horizontal en  $T_E$  indica la reacción eutéctica, que en este caso se producirá para un intervalo de composiciones.

## Enfriamiento lento de algunas aleaciones

Consideremos las aleaciones que se indican en la siguiente gráfica:

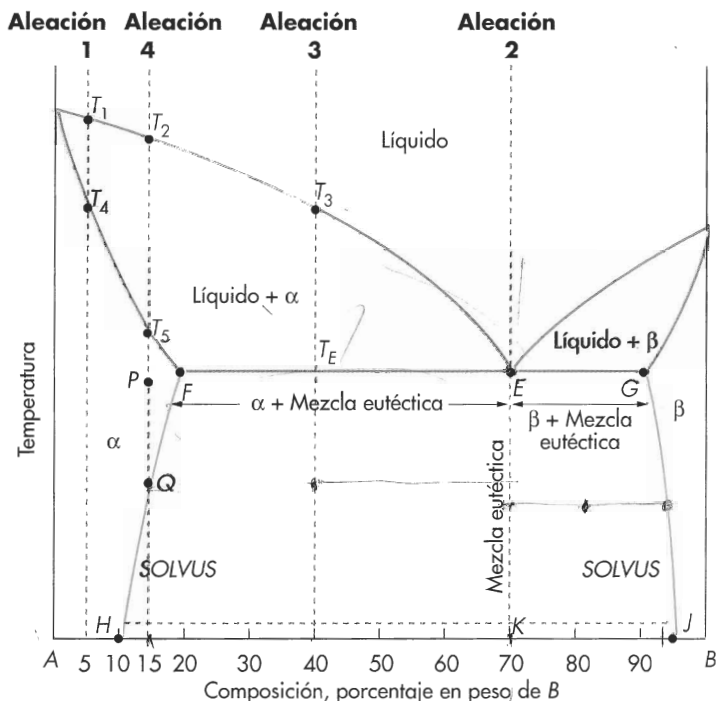
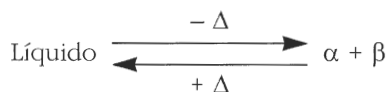


Fig. 19. Enfriamiento lento de cuatro aleaciones AB con solubilidad total en estado líquido y solubilidad parcial en estado sólido.

**Aleación 1.** Sigue un proceso exactamente igual al de cualquier aleación de solubilidad total en líquido y sólido (Fig.20).

A la temperatura  $T_1$  la aleación comienza a solidificar, formándose cristales ricos en A, y el líquido se enriquece en B. A la temperatura  $T_4$  termina la solidificación, siendo el sólido total una solución sólida  $\alpha$  homogénea que permanece así hasta la temperatura ambiente.

**Aleación 2.** Es la composición eutéctica y permanece líquida hasta la temperatura  $T_E$ , sufriendo la reacción eutéctica a temperatura constante y originando la mezcla eutéctica formada por dos fases  $\alpha$  y  $\beta$ :



Las cantidades relativas de  $\alpha$  y  $\beta$  pueden calcularse mediante la ya conocida regla de la palanca.

Debido al cambio de solubilidad de B en A y de A en B, dado por las curvas de solvus, habrá un cambio en las cantidades relativas de  $\alpha$  y de  $\beta$  cuando se enfíen hasta la temperatura ambiente.

En la práctica, no es posible diferenciar de forma microscópica si la mezcla eutéctica está formada por dos soluciones  $\alpha$  y  $\beta$  o por dos metales puros A y B.

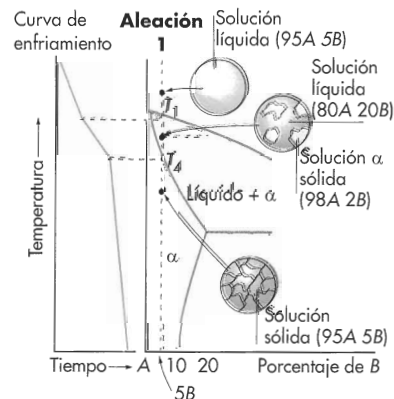


Fig. 20. Enfriamiento de la aleación 1.

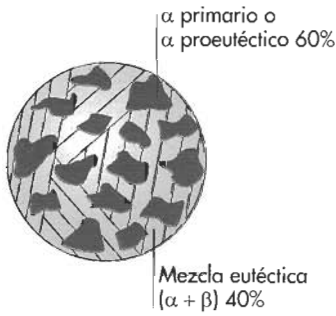


Fig. 21. Microestructura de la aleación 3 a temperatura ambiente.

**Aleación 3.** Se encuentra en estado líquido hasta  $T_3$ , donde empieza a cristalizar la solución sólida  $\alpha$  rica en A. A medida que la temperatura disminuye, el líquido se hace más rico en  $\beta$ . Cuando llegamos a  $T_E$  el líquido que resta sufre la reacción eutéctica ( $\alpha$  y  $\beta$ ) de composición dada por los extremos de la recta  $FG$  (Fig. 22).

A medida que desciende la temperatura, precipita algo de  $\beta$  debido al descenso de solubilidad indicado por la *solvus*.

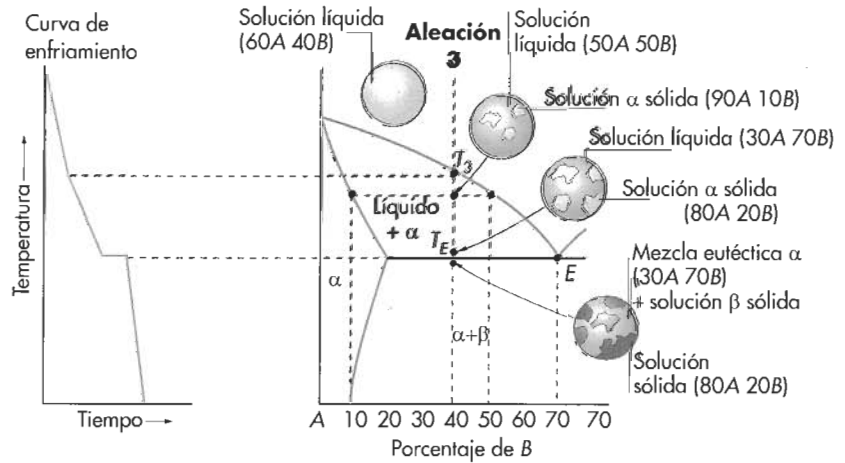


Fig. 22. Enfriamiento de la aleación 3.

**Aleación 4.** Sigue el mismo proceso que la aleación 1. El punto  $P$  es una solución insaturada. En el punto  $Q$  la solución se satura de B. A temperatura ambiente el exceso B debe salir, pero como A es soluble en B, este exceso sale como solución sólida  $\beta$  (Fig. 24).

A temperatura ambiente la aleación consistirá fundamentalmente en granos de  $\alpha$  con pequeñas cantidades de  $\beta$  alojadas en las fronteras de grano. Esta cantidad la podemos determinar mediante la regla de la palanca.

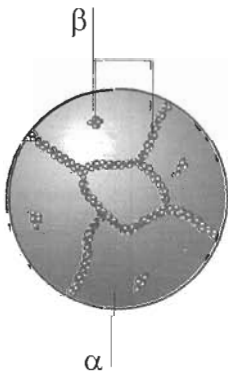


Fig. 23. Microestructura de la aleación 4 a temperatura ambiente.

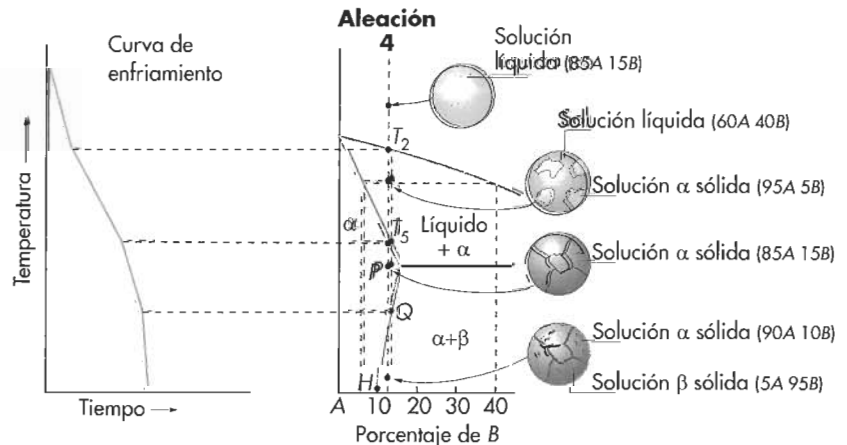
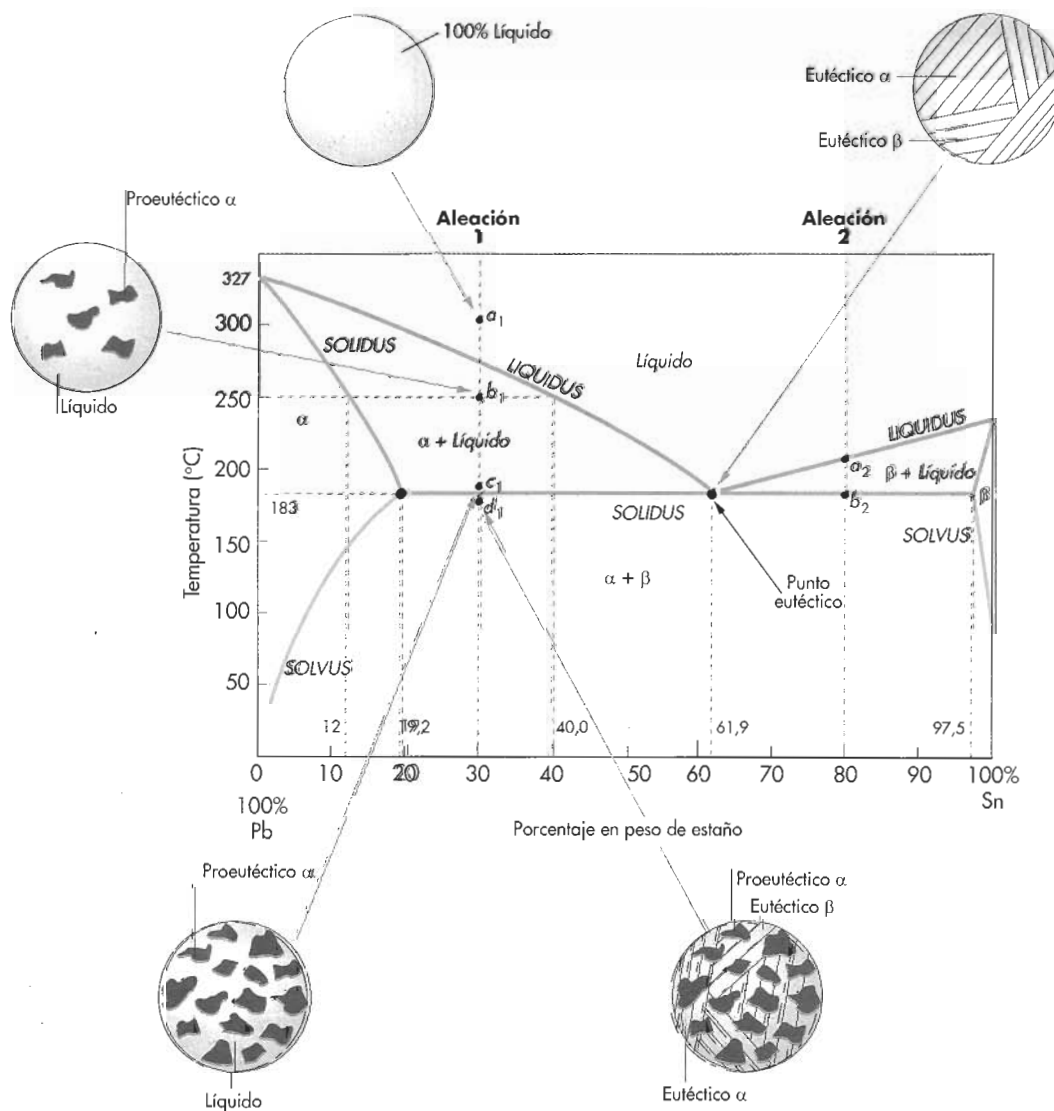


Fig. 24. Enfriamiento de la aleación 4.

### EJEMPLO 1

Un kilogramo de una aleación (aleación 1) de un 70 por 100 en Pb y un 30 por 100 en Sn se enfría lentamente desde 300 °C. Utiliza el diagrama de fases estaño-plomo de la figura y calcula lo siguiente:

- El porcentaje en peso del líquido y del proeutéctico alfa a 250 °C.
- El porcentaje en peso del líquido y del proeutéctico alfa justo encima de la temperatura eutéctica (183 °C), y el peso en kilogramos de esas fases.
- El peso en kilogramos de alfa y beta formados por la reacción eutéctica.
- Describir las transformaciones de la aleación 2 durante el enfriamiento.



### Solución:

a) De la figura a 250 °C:

$$\% \text{ en peso líquido} = \frac{30 - 12}{40 - 12} \cdot 100 = 64\%$$

$$\% \text{ en peso proeutéctico } \alpha = \frac{40 - 30}{40 - 12} \cdot 100 = 36\%$$

b)  $\% \text{ en peso líquido} = \frac{30 - 19,2}{61,9 - 19,2} \cdot 100 = 25,3\%$

$$\% \text{ en peso proeutéctico } \alpha = \frac{61,9 - 30,0}{61,9 - 19,2} \cdot 100 = 74,7\%$$

$$\text{Peso de la fase líquida} = 1 \text{ kg} \times 0,253 = 0,253 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del proeutéctico } \alpha = 1 \text{ kg} \times 0,747 = 0,747 \text{ kg}$$

c) A 183 °C  $-\Delta T$

$$\% \text{ en peso total (proeutéctico } \alpha + \text{ eutéctico } \alpha) = \frac{97,5 - 30}{97,5 - 19,2} \cdot 100 = 86,2\%$$

$$\% \text{ en peso total } \beta \text{ (eutéctico } \beta) = \frac{30 - 19,2}{97,5 - 19,2} \cdot 100 = 13,8\%$$

$$\text{Peso total de } \alpha = 1 \text{ kg} \times 0,862 = 0,862 \text{ kg}$$

$$\text{Peso total de } \beta = 1 \text{ kg} \times 0,138 = 0,138 \text{ kg}$$

La cantidad de proeutéctico  $\alpha$  permanecerá constante antes y después de la reacción eutéctica. Por tanto:

$$\text{Peso } \alpha \text{ creado por la reacción eutéctica} = \text{total } \alpha - \text{proeutéctico } \alpha = 0,862 \text{ kg} - 0,747 \text{ kg} = 0,115 \text{ kg}$$

$$\text{Peso } \beta \text{ creado por la reacción eutéctica} = \text{total } \beta = 0,138 \text{ kg}$$

d) – Por encima del punto  $a_2$  la aleación se encuentra en estado líquido.

– Al alcanzar la temperatura  $a_2$ , comienzan a formarse cristales de la solución sólida  $\beta$ .

– Entre los puntos  $a_2$  y  $b_2$  coexisten dos fases: una sólida, formada por cristales  $\beta$  y otra líquida, de composición  $A + B$ .

– Cuando se alcanza la temperatura  $b_2$ , la aleación ha finalizado la cristalización y toda la mezcla líquida ha pasado a estado sólido con el constituyente eutéctico.