

4. Los metales. Cristalización y diagramas de equilibrio de fases

Las **aleaciones** son mezclas cristalinas de dos metales o de un metal y un no metal. Las aleaciones en estado sólido presentan carácter metálico.

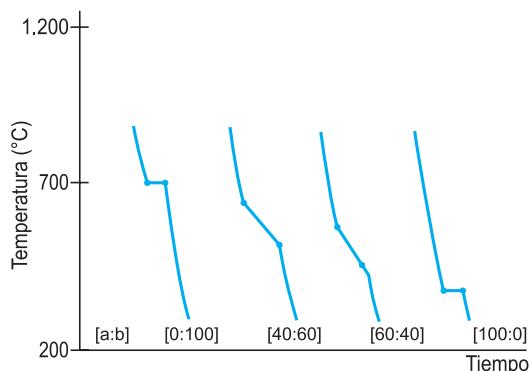
En una aleación, el componente que se encuentra en mayor proporción se conoce como **disolvente** y el que aparece en una proporción menor se denomina **sóluto**.

Los materiales metálicos y sus aleaciones son los más utilizados en la industria. Se obtienen a partir de sus componentes fundidos y solidificados en procesos posteriores. Estos procesos de cristalización influyen directamente en sus propiedades mecánicas.

■ Cristalización de los metales puros y de las aleaciones

Los metales puros solidifican a una temperatura determinada de valor constante durante todo el proceso de cristalización.

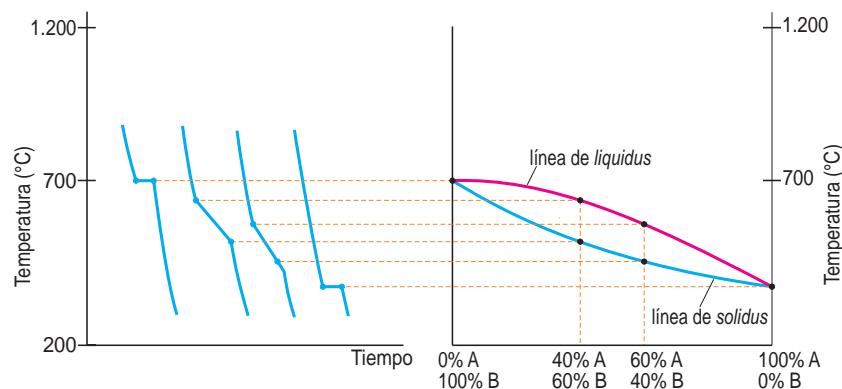
Sin embargo, para el caso de las aleaciones, y de acuerdo con el porcentaje de cada elemento de la aleación, el proceso de cristalización se produce en un rango de temperaturas entre las que el cristal va solidificando.



En la gráfica se observan las curvas de enfriamiento de una aleación de dos metales (A y B). Las líneas primera y última corresponden a los metales A y B puros, respectivamente. Las líneas segunda y tercera corresponden a dos aleaciones de A y B con concentraciones diferentes de ambos metales.

■ Diagramas de equilibrio de fases

Si, para la aleación del ejemplo anterior, presentamos en una gráfica el valor de la **temperatura** frente a las distintas **concentraciones** de los metales en la aleación, obtenemos un diagrama como el siguiente:



Estos diagramas representan las fases estables de una aleación. Las fases de una sustancia pura son: sólida, líquida o gaseosa. La línea de **liquidus** se obtiene uniendo todos los puntos de inicio de solidificación. Por encima de ella, la aleación para cualquier concentración se encuentra en estado líquido.

La línea de **solidus** se obtiene uniendo todos los puntos de fin del proceso de solidificación. Por debajo de ella, la aleación para cualquier concentración se encuentra en estado sólido.

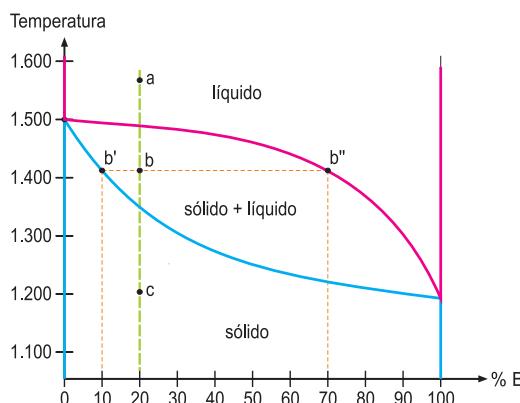
Entre ambas líneas coexisten aleación en estado líquido y aleación en estado sólido.

■ Tipos de diagramas de equilibrio de fases

En función de la solubilidad de los componentes de las **aleaciones de metales** tenemos diagramas de equilibrio de fases distintos. Los vemos a continuación:

- **Aleación formada por dos componentes A y B totalmente solubles en estado sólido y en estado líquido**

Las aleaciones totalmente solubles en estado líquido y en estado sólido presentan un diagrama de equilibrio de fases como el de la figura.



Supongamos una aleación formada por un 20% de B y un 80% de A. Para ver por qué estados pasa esta aleación en función de la temperatura, trazamos una vertical en el punto 20 (material B). Distinguimos tres zonas de trabajo:

- En el punto *a*, toda la aleación está en estado líquido. Su composición es 20% de B y 80% de A.
- En el punto *b* existen dos fases: aleación en estado sólido y aleación en estado líquido.

Para calcular la composición química de cada fase se utiliza la **regla de la horizontal**: se traza una línea horizontal por el punto *b* que corta las líneas de *solidus* y *liquidus* en los puntos *b'* y *b''*. La abscisa de cada uno de estos puntos de corte indica la composición de la fase:

- ◆ *b'* (*solidus*): la composición de la fase sólida es 10% de B y 90% de A.
- ◆ *b''* (*liquidus*): la composición de la fase líquida es 70% de B y 30% de A.

Para calcular la cantidad o proporción de aleación sólida y aleación líquida en la mezcla se utiliza la **regla de la palanca** (o **de los segmentos inversos**):

- ◆ Cantidad de aleación sólida. Se obtiene dividiendo la distancia *b''-b* (en este ejemplo, $70 - 20 = 50$), esto es, la distancia entre la línea de *liquidus* y el punto *b*, de ahí la expresión “segmento inverso”, entre la distancia *b''-b'* (en este ejemplo, $70 - 10 = 60$). Por tanto:

$$Q_s = \frac{50}{60} = 0,83 \Rightarrow w_s = 83,3\%$$

- ◆ Cantidad de aleación líquida. Análogamente, se obtiene dividiendo la distancia *b-b'* (en este ejemplo, $20 - 10 = 10$), esto es, la distancia entre el punto *b* y la línea de *solidus*, entre la distancia *b''-b'* (en este ejemplo, $70 - 10 = 60$). Por tanto:

$$Q_l = \frac{10}{60} = 0,16 \Rightarrow w_l = 16,7\%$$

- En el punto *c* existe una única fase, aleación en estado sólido, formada por un 20% de B y un 80% de A.

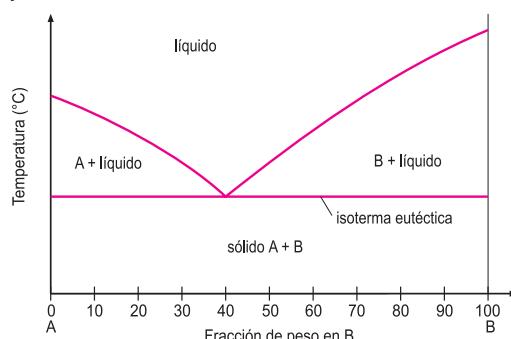
A partir de un diagrama de equilibrio de fases podemos conocer:

- El número de fases
- La composición de cada fase (regla de la horizontal)
- La cantidad o proporción de cada fase (regla de la palanca o de los segmentos inversos)

Una **reacción eutéctica** es aquella en la que una aleación de dos metales A y B en estado líquido cristaliza por enfriamiento en dos fases sólidas alternas de elementos A y B puros.

- Aleación formada por dos componentes A y B totalmente solubles en estado líquido e insolubles en estado sólido**

Las aleaciones de este tipo presentan un diagrama de equilibrio de fases similar al de la figura siguiente. Aparece en la gráfica un pico en la línea de *liquidus*, correspondiente al **punto eutéctico**. En este punto, la aleación solidifica a una temperatura constante, de forma similar a como lo haría un metal puro. El **eutéctico** (o **compuesto eutéctico**) es la aleación que presenta un punto de fusión más bajo.

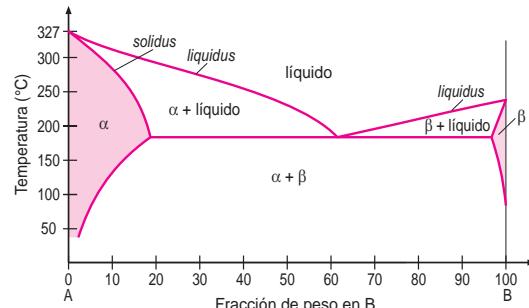


En la gráfica se distinguen cuatro zonas:

- Líquido: aleación en estado líquido.
- A + líquido: aleación en estado líquido y sólido A puro.
- B + líquido: aleación en estado líquido y sólido B puro.
- Sólido A+B: sólido formado por granos de metal A y de metal B que no se mezclan dentro del cristal.

- Aleación formada por dos componentes A y B totalmente solubles en estado líquido y parcialmente solubles en estado sólido**

Lo más frecuente no es que los elementos sean insolubles en estado sólido, sino que la mayoría de los metales presentan cierta solubilidad, es decir, admiten pequeñas cantidades de otros metales. En este caso, el diagrama de equilibrio de fases es similar al siguiente:



Aparece un punto eutéctico en el que la aleación, cuando se enfria, pasa del estado líquido a una estructura sólida con dos fases separadas α y β . Se produce la reacción eutéctica.

De acuerdo con la concentración y la temperatura, se distinguen seis zonas:

- Zona de líquido L: aleación en estado líquido.
- Zona sólida α : solución sólida de componente B en A.
- Zona sólida β : solución sólida de componente A en B.
- Zona $\alpha+L$: coexisten una aleación en estado líquido y una solución sólida de B en A.
- Zona $\beta+L$: coexisten una aleación en estado líquido y una solución sólida de A en B.
- Zona $\alpha+\beta$: coexisten las soluciones sólidas α y β .

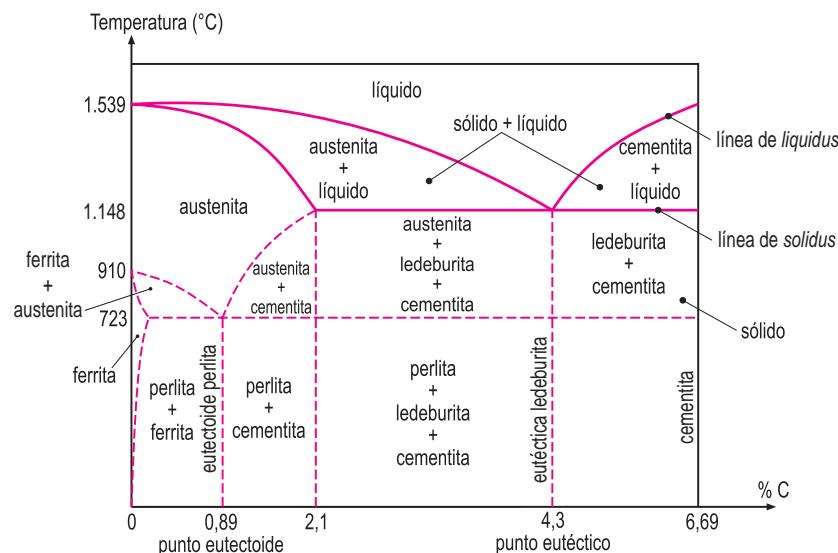
5. Alotropía. Diagrama de equilibrio hierro-carbono

La **alotropía** es un fenómeno por el cual determinados materiales presentan estructuras cristalinas diferentes cuando cristalizan bajo distintas condiciones de presión y temperatura.

El **hierro** es uno de estos materiales. Presenta diferentes estructuras alotrópicas en función de la temperatura, lo que resulta muy importante desde el punto de vista industrial, ya que el hierro forma parte, junto con el carbono, de aleaciones como los aceros y las fundiciones. La capacidad del hierro para disolver más o menos cantidad de carbono depende de su estructura alotrópica.

Diagrama de equilibrio hierro-carbono

El **diagrama hierro-carbono** (o **diagrama Fe-C**) recoge los estados de equilibrio de las aleaciones de hierro y carbono en función de la temperatura y los estados alotrópicos del hierro:



Se denominan **aceros** aquellas aleaciones cuyo contenido en carbono es menor del 2,1%. Se denominan **fundiciones** aquellas aleaciones cuyo contenido en carbono se encuentra entre el 2,1% y el 6,69% (ésta es la máxima cantidad de carbono que puede disolver el hierro).

Los principales **constituyentes de las aleaciones hierro-carbono** en función de la temperatura de cristalización son:

- **Cementita.** Es carburo de hierro (Fe_3C). Es un constituyente muy duro y frágil, y la aleación que presenta un mayor porcentaje de carbono (6,69%).
- **Perlitina.** Es un sólido formado por dos fases diferentes, ferrita y cementita, situadas en capas alternas. No es muy dura.
- **Austenita.** Está formada por hierro y carbono hasta el 2,1%. Es el constituyente más denso de los aceros.
- **Ledeburita.** Este componente se produce en la reacción eutéctica; es, pues, el componente eutéctico. Al enfriarse, la aleación líquida cristaliza en austenita y cementita. Si la ledeburita continúa enfriándose, en torno a los 700 °C se descompone en ferrita y cementita. No es un constituyente de los aceros sino de las fundiciones.

En el diagrama de equilibrio hierro-carbono se produce una **reacción eutéctica**: el líquido cristaliza en dos fases sólidas (austenita y cementita). El **punto eutéctico** se produce para una aleación con un porcentaje de carbono del 4,3% y a la temperatura de 1.148 °C.

Se produce también una reacción similar a la eutéctica: la **reacción eutectoide**. En este caso, un sólido origina por enfriamiento dos fases sólidas diferentes. El **punto eutectoide** se produce a 723 °C, donde la austenita, con una concentración de carbono del 0,89%, origina, al enfriarse, **perlitina** (formada por capas alternas de ferrita y cementita).

Estados alotrópicos del hierro

Hierro α (o **ferrita**). Cristaliza a 768 °C en la estructura cristalina BCC. Es magnético y apenas disuelve carbono.

Hierro β . Cristaliza entre 768 y 910 °C en la estructura BCC. No es magnético.

Hierro γ . Cristaliza entre 910 y 1.400 °C en la estructura FCC. Puede disolver hasta un 2% de carbono formando una disolución sólida denominada *austenita*.

Hierro δ . Cristaliza entre 1.400 y 1.539 °C en la estructura BCC. Es muy parecido al hierro α . Tiene poca aplicación.

6. Procedimientos de ensayo y medida

El mundo actual, en el que se producen avances tecnológicos de forma muy rápida, necesita materiales que puedan responder a las exigencias físicas que requieren las nuevas situaciones. Por ello, es importante determinar con la mayor precisión posible las propiedades de cada material.

Los **ensayos** son estudios normalizados de las propiedades de un determinado material que proporcionan una medida muy precisa de éstas.

Para llevar a cabo los diferentes ensayos se utilizan **probetas**, que son piezas de dimensiones normalizadas construidas con el material cuyas características se desean analizar.

Se utiliza un tipo de ensayo diferente para conocer cada propiedad:

■ Ensayo de tracción



Probetas de distintos materiales sometidas a ensayos de tracción



Máquina para realizar ensayos de tracción

Este ensayo permite conocer cómo se deformará un material ante un esfuerzo de tracción determinado.

Se escoge una probeta de un material y se sitúa entre las mordazas de la máquina de ensayos. Se somete la probeta a un esfuerzo de tracción creciente a lo largo de su eje y se determina el alargamiento que sufre hasta que se rompe.

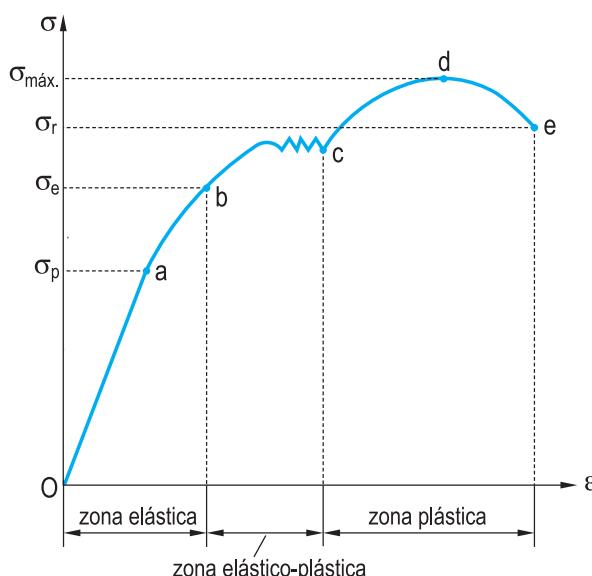
La **tensión (σ)** es el cociente entre la fuerza aplicada sobre la probeta (F) y el área de su sección (s). Se mide en pascales ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$).

$$\sigma = \frac{F}{s}$$

La **deformación o alargamiento unitario (ϵ)** de la probeta es el cociente entre el alargamiento producido y la longitud inicial.

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Se representa en una gráfica la deformación producida frente a la tensión soportada por la probeta. En un **diagrama de tracción** se identifican dos zonas:



Conoce

- **Zona elástica (0-b).** La deformación experimentada por la probeta en esta zona no es permanente: si deja de actuar el esfuerzo de tracción, la probeta recupera su longitud inicial. Existen en esta zona dos espacios diferenciados:
 - *0-a* (zona de proporcionalidad elástica). Existe una relación proporcional entre el esfuerzo y la deformación producida. Se cumple que $\sigma = \epsilon \cdot E$, donde E es el módulo de Young (específico para cada material), que se mide en N/m².
 - *a-b* (zona elástica no proporcional). Las deformaciones no son permanentes pero no existe una relación de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación.
- **Zona plástica (b-e).** En esta zona, las deformaciones son permanentes y el material no recupera su longitud inicial aunque cesen los esfuerzos de tracción. Consta de tres espacios:
 - *b-c* (zona de fluencia). Esta zona sólo aparece cuando el material de estudio es un acero. En ella, la deformación aumenta significativamente sin que lo haga la tensión aplicada. La tensión en el punto *b* se denomina *tensión de fluencia*.
 - *c-d* (zona de deformación plástica uniforme). Las deformaciones son grandes para pequeños aumentos de la tensión. En esta zona se halla el punto de máxima tensión (o tensión de rotura). A partir de ese valor se considera que la probeta está rota, aunque físicamente no lo esté.
 - *d-e*. En esta zona, la probeta termina por romperse.

■ Ensayo de dureza

Este ensayo sirve para determinar la resistencia que presenta un determinado material a ser rayado o perforado.

Los ensayos de dureza utilizan penetradores de formas diferentes sobre los que se aplica una fuerza de valor conocido. A partir de la medida de la huella que el penetrador deja en el material, se obtiene un valor de la dureza de éste. De acuerdo con la forma del penetrador, los ensayos más utilizados son:

- **Ensayo de Brinell.** En este caso, el penetrador es una esfera de acero templado de diámetro D . La **dureza Brinell (HB)** se obtiene como el cociente entre la carga aplicada F (en kilopondios, kp) y la superficie de la huella S (en mm²).

$$HB = \frac{F}{S}$$

Las cargas aplicadas se relacionan con el diámetro de la bola mediante esta ecuación, donde K (en kp/mm²) es una constante diferente para cada material:

$$F = K \cdot D^2$$

La huella que deja el penetrador es un casquete esférico que se calcula así:

$$S = \pi \cdot D \cdot f$$

donde f (en milímetros) es la profundidad de la huella.

Además, utilizando el teorema de Pitágoras se obtiene que:

$$f = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{d^2}{4}}$$

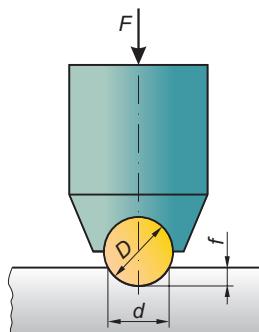
Por tanto, la dureza Brinell se puede expresar como:

$$HB = \frac{F}{S} = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

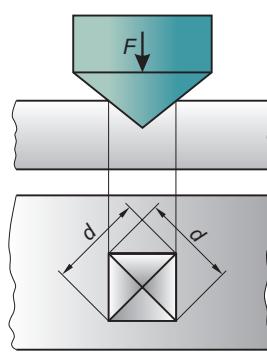
El valor de la dureza Brinell se expresa indicando la dureza, el diámetro de la esfera (en milímetros), la carga aplicada (en kilopondios) y el tiempo de duración del ensayo (en segundos). Por ejemplo: 200 HB, 5 mm, 750 kp, 20 s.



Penetrador de acero para ensayo de Brinell



Ensayo de Brinell



Ensayo de Vickers

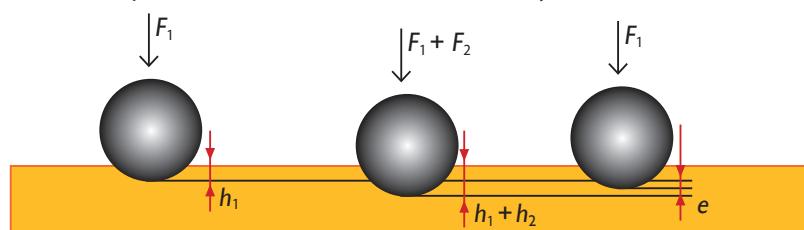
- **Ensayo de Vickers.** En este caso, el penetrador es una pirámide de base cuadrada y ángulo de 136° entre sus caras.

El valor de la **dureza Vickers (HV)** se da en función de la carga aplicada F (en kilopondios) y la diagonal de la huella que marca el penetrador d (en milímetros):

$$HV = \frac{1,854 \cdot F}{d^2}$$

- **Ensayo de Rockwell.** En este caso, se usan como penetradores bolas de acero o conos de diamante, en función de la dureza del material.

Para realizar el ensayo, se aplica una carga inicial (F_1) sobre el material y se mide la huella que produce (h_1). Se añade una carga suplementaria (F_2) y se produce entonces la huella máxima (h_2). Se retira la carga suplementaria y se mide la huella permanente producida (e). La **dureza Rockwell (HR)** se determina como $HR = 100 - e$ (para materiales de dureza Brinell menor de 200) o bien $HR = 130 - e$ (para materiales de dureza Brinell mayor de 200).



■ Ensayo de resiliencia

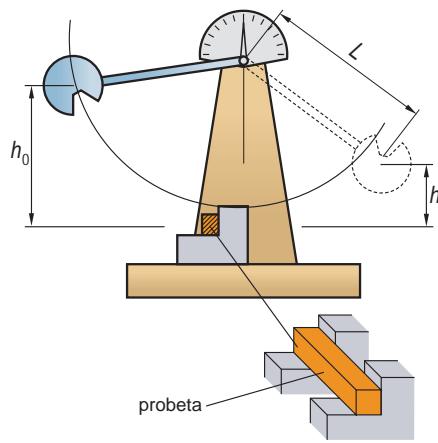
Este ensayo, conocido también como **ensayo de Charpy**, proporciona una medida de la energía que absorbe una probeta normalizada antes de romperse por un impacto.

La probeta tiene una hendidura o entalla realizada antes de iniciar el ensayo para facilitar su rotura.

Se deja caer sobre la probeta un péndulo o martillo de masa m desde una altura inicial (h_0). Tras el impacto, el péndulo continúa su movimiento ascendiendo una altura determinada (h_f). La diferencia de energía potencial entre los dos estados será absorbida por el material para romperse.

El valor de la resiliencia del material se define como la energía o trabajo de rotura (en julios) por unidad de superficie del material, S (en mm^2):

$$\rho = \frac{-\Delta E_p}{S} = \frac{m \cdot g \cdot (h_0 - h_f)}{S}$$



Péndulo de Charpy