

## Sugerencias Didácticas

- La gran importancia tecnológica del acero en la sociedad actual justifica dedicar esta Unidad al estudio de su estructura interna, así como la posibilidad de modificarla por medio de tratamientos térmicos. Se deben considerar, en primer lugar, las características del diagrama de equilibrio hierro-carbono, los distintos constituyentes de las aleaciones de estos dos elementos y las transformaciones que tienen lugar en los procesos de enfriamiento de las mismas. A este respecto, es importante el estudio de los puntos eutéctico y eutectoide, y las diferencias de comportamiento de las aleaciones cuya composición las sitúa en el diagrama a un lado u otro de estos puntos.
- También se analizarán las transformaciones que se realizan a través de enfriamientos o calentamientos rápidos, que son las que tienen lugar a nivel industrial. En estos casos son importantes los diagramas TTT, que permiten llevar a cabo el estudio de los tratamientos térmicos de los aceros.
- Conviene que el alumnado se dé cuenta de la necesidad de mejorar las propiedades de los aceros por medio de distintos tipos de tratamientos. Una vez establecida una clasificación de los mismos, se estudiarán de la forma más detallada posible, analizándolos de forma comparativa, fijando el objetivo de cada uno de ellos y la manera en que se llevan a cabo en la práctica.

## SOLUCIONES a las Actividades propuestas

Pág.

86

1. El hierro  $\gamma$  cristaliza en la red FCC y su celda unidad, de volumen

$$V = a_0^3 = (36,5 \cdot 10^{-9} \text{ m})^3 = 4,8627 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$$

contiene cuatro átomos.

Por otra parte, el hierro  $\alpha$  cristaliza en la red BCC y su celda unidad contiene dos átomos, siendo su volumen:

$$V' = a_0'^3 = (29,0 \cdot 10^{-9} \text{ m})^3 = 2,4389 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$$

Al producirse la transformación alotrópica hierro  $\gamma \rightarrow$  hierro  $\alpha$ , la variación de volumen que tiene lugar por cada 4 átomos es:

$$\Delta V = V' - V = 2 \cdot 2,4389 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3 - 4,8627 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3 = 0,0151 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$$

Por lo tanto:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{0,0151 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3}{4,8627 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3} = 3,1 \cdot 10^{-3} = \boxed{0,3 \%}$$

2. a) Falsa. En un acero con contenido en carbono inferior al 0,77 % la fase matriz es la *ferrita*.  
 b) Falsa. Un acero hipereutectoide a temperatura ambiente está constituido por *perlita* y *cementita*.  
 c) Falsa. Un acero eutectoide no funde a 727 °C. A esta temperatura se transforma en *austenita*.  
 d) Cierta. Precisamente, esta temperatura de 1148 °C es la única a la que funde un acero del 4,3 % de contenido en carbono (punto eutéctico).  
 e) Cierta. Véase el diagrama hierro-carbono.

3. Consideremos la porción de diagrama hierro-carbono de la figura (a).

Por semejanza entre triángulos rectángulos, se cumple:

$$\frac{1538 \text{ °C} - 1495 \text{ °C}}{1538 \text{ °C} - 1510 \text{ °C}} = \frac{0,09 \%}{x}$$

de donde resulta:

$$\boxed{x = 0,059 \% \text{ de C}}$$

4. En este caso, también por semejanza de triángulos, se cumple: (Figura b)

$$\frac{1495 \text{ °C} - 1394 \text{ °C}}{T_{\text{inicial}} - 1394 \text{ °C}} = \frac{0,09 \%}{0,07 \%}$$

de donde:

$$\boxed{T_{\text{inicial}} = 1473 \text{ °C}}$$

Además, en la misma figura se aprecia:

$$\frac{1495 \text{ °C} - 1394 \text{ °C}}{T_{\text{final}} - 1394 \text{ °C}} = \frac{0,17 \%}{0,07 \%}$$

y de aquí resulta:  $\boxed{T_{\text{final}} = 1436 \text{ °C}}$

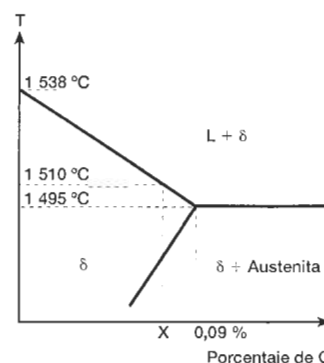


Figura (a)

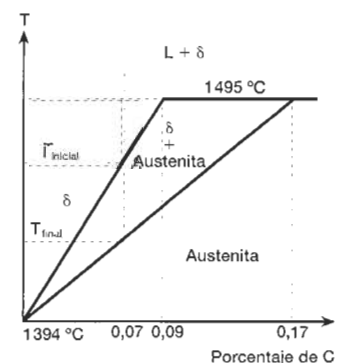


Figura (b)

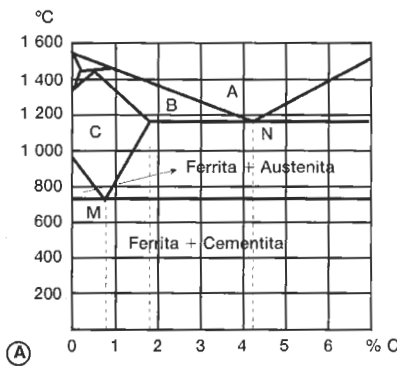
**SOLUCIONES a las Actividades de Síntesis**

- A 1 538 °C el hierro líquido solidifica, formándose hierro  $\delta$  (estructura BCC; parámetro de red cristalina:  $a_0 = 29,3$  nm).
  - A 1 394 °C el hierro  $\delta$  se transforma en hierro  $\gamma$  (estructura FCC; parámetro de red cristalina:  $a_0 = 36,5$  nm). El hierro  $\gamma$  es deformable, poco duro y ofrece una gran resistencia al desgaste.
  - A 910 °C el hierro  $\gamma$  se transforma en hierro  $\alpha$  (estructura BCC; parámetro de red cristalina:  $a_0 = 29,0$  nm). Es muy blando y maleable y forma parte de los aceros hipoeutectoides y de la perlita.
- Velocidad crítica de temple es la mínima velocidad a la que se debe enfriar un acero eutectoide para que su estructura resultante sea 100 % martensita.
- La temperatura mínima de inicio de solidificación de una aleación Fe-Fe<sub>3</sub>C es la de 1 148 °C (punto eutéctico). Esta temperatura es también la de final de solidificación.
- Tal aleación ha de poseer un contenido en carbono superior al 2,11 %.
- Las tres fases indicadas son las siguientes:
    - A: Líquido.
    - B: Líquido + hierro  $\gamma$ .
    - C: Austenita (hierro  $\gamma$ ).

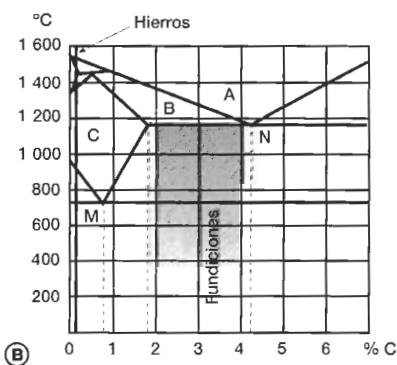
Las características de estas fases aparecen explicadas en la parte expositiva del texto.

b) El punto M es un eutectoide (*perlita*) y el N un eutéctico (*ledeburita*). Para el estudio de sus características, véanse las páginas 82 y 83 del texto.

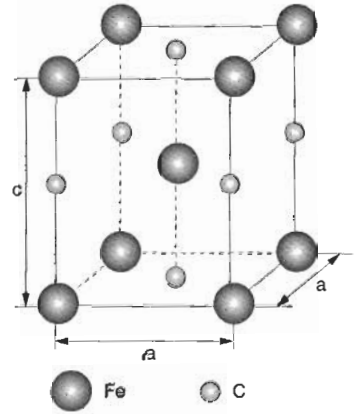
c) La situación de la ferrita y de la cementita aparece recogida en el diagrama A.



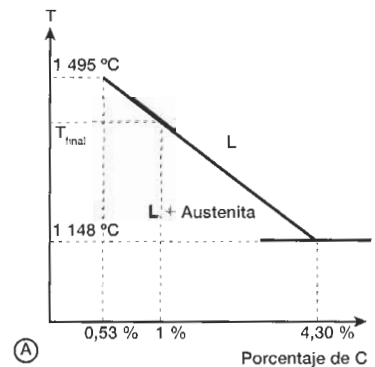
d) En el diagrama B se señalan las zonas correspondientes a hierros y fundiciones.



e) La martensita es una solución sobresaturada de carbono en hierro  $\alpha$ , y, si se exceptúa la cementita, es el constituyente más duro de los aceros. No cristaliza en la red cúbica centrada en las caras, como lo hace el hierro  $\alpha$ , sino que, debido a la deformación producida en dicha red por la inserción de los átomos de carbono, su cristalización se verifica en la red tetragonal centrada en el cuerpo. Su dureza varía de 50 a 68 HRC; su resistencia mecánica de 1 740 a 2 450 MPa, y su alargamiento a rotura de 0,5 % a 2,5 %. La martensita se origina al someter una estructura austenítica a un enfriamiento muy rápido.



- Consideremos la porción de diagrama hierro-carbono de la figura A.



Por semejanza entre triángulos rectángulos, se cumple:

$$\frac{1\% - 0,53\%}{1495\text{ °C} - T_{\text{final}}} = \frac{4,30\% - 0,53\%}{1495\text{ °C} - 1148\text{ °C}}$$

de donde resulta:

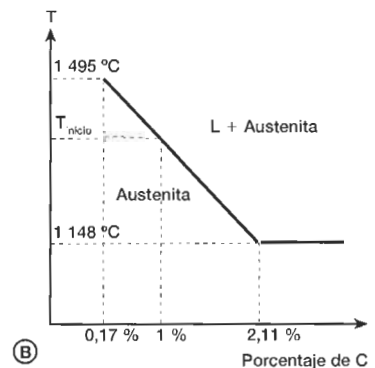
$$T_{\text{final}} = 1452\text{ °C}$$

Procediendo del mismo modo en la porción de diagrama de la figura B, se tiene:

$$\frac{1\% - 0,17\%}{1495\text{ °C} - T_{\text{inicio}}} = \frac{2,11\% - 0,17\%}{1495\text{ °C} - 1148\text{ °C}}$$

y de aquí resulta:

$$T_{\text{inicio}} = 1347\text{ °C}$$



7. Utilizando los mismos diagramas de la actividad anterior, se pueden establecer las siguientes proporciones:

$$\frac{2\% - 0,53\%}{1495\text{ °C} - T_{\text{final}}} = \frac{4,30\% - 0,53\%}{1495\text{ °C} - 1148\text{ °C}}$$

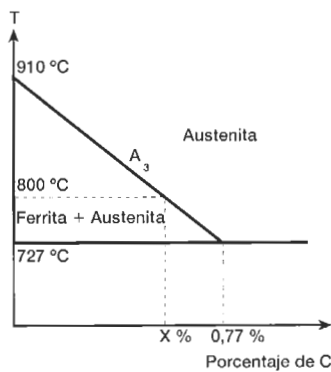
$$\frac{2\% - 0,17\%}{1495\text{ °C} - T_{\text{inicio}}} = \frac{2,11\% - 0,17\%}{1495\text{ °C} - 1148\text{ °C}}$$

que conducen a los siguientes resultados:

$$T_{\text{final}} = 1360\text{ °C} ; T_{\text{inicio}} = 1168\text{ °C}$$

8. En la porción de diagrama hierro-carbono de la figura se puede establecer la proporción:

$$\frac{0,77\%}{910\text{ °C} - 727\text{ °C}} = \frac{x}{910\text{ °C} - 800\text{ °C}}$$

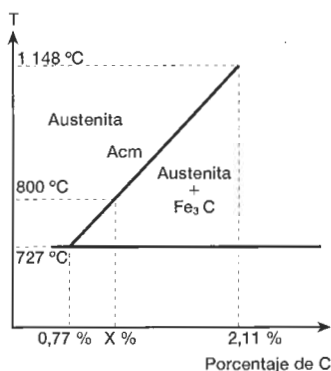


de donde resulta:

$$x = 0,46\%$$

9. Procediendo de modo análogo a la actividad anterior, teniendo en cuenta la semejanza entre triángulos rectángulos podemos escribir:

$$\frac{2,11\% - 0,77\%}{1148\text{ °C} - 727\text{ °C}} = \frac{x - 0,77\%}{800\text{ °C} - 727\text{ °C}}$$



de donde:

$$x = 1\%$$

10. Aplicando la regla de la palanca, se obtiene:

$$\% \text{ de ferrita} = \frac{6,67 - 1}{6,67} \cdot 100 = 85\%$$

$$\% \text{ de cementita} = \frac{1 - 0}{6,67} \cdot 100 = 15\%$$

11. Aplicando la regla de la palanca, tenemos:

$$\% \text{ de ferrita} = \frac{0,77 - 0,5}{0,77 - 0,0218} \cdot 100 = 36,1\%$$

$$\% \text{ de austenita} = \frac{0,5 - 0,0218}{0,77 - 0,0218} \cdot 100 = 63,9\%$$

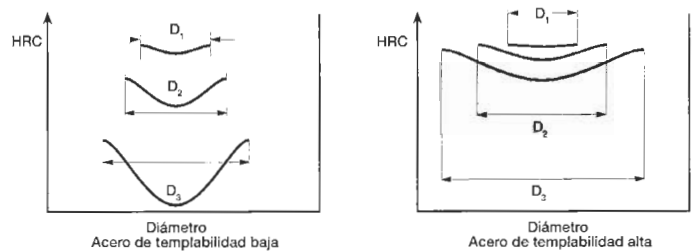
$$\% \text{ de cementita} = 0\%$$

El diagrama hierro-carbono de la página 82 del texto pone de manifiesto que los contenidos en carbono de la ferrita y de la austenita son:

$$\text{ferrita} = 0,0218\% \text{ de C}$$

$$\text{austenita} = 0,77\% \text{ de C}$$

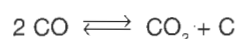
12. Analizando la dureza de redondos de acero templado, midiéndola a lo largo de un diámetro, se observa que si el acero es de alta templabilidad la dureza es prácticamente constante (la del centro y la de la periferia son casi iguales); mientras que si se trata de un acero de templabilidad baja, existen considerables diferencias en su dureza conforme varía la distancia al centro.



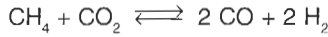
13. Recibe el nombre de acritud el estado fuertemente tensionado en que se encuentra la estructura martensítica obtenida como resultado del temple de un acero. Para eliminarla, se somete el acero templado a un tratamiento térmico de revenido, que se lleva a cabo calentándolo hasta una temperatura inferior a A1, con objeto de obtener una estructura más dúctil y tenaz. Los efectos de este tratamiento dependen en gran medida de la temperatura y del tiempo de duración del proceso. El tratamiento completo de temple más revenido recibe el nombre de bonificado.

14. La cementación consiste en añadir carbono, mediante difusión, a la superficie de un acero que presente un bajo contenido en este elemento (como máximo, 0,2-0,3 %) con el objeto de aumentar su dureza superficial. Para facilitar la difusión del carbono, la pieza a la que se pretende aplicar el tratamiento se somete durante cierto tiempo a un medio carburante a una temperatura elevada (alrededor de 900 °C). A esta temperatura se favorece la adición de carbono, pues por una parte aumenta la velocidad de difusión, y por otra el acero admite un mayor contenido en carbono en solución. El contenido máximo en carbono superficial que se consigue en una pieza sometida a un proceso de cementación se aproxima al 1 %.

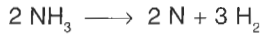
La atmósfera carburante necesaria se puede lograr por medio de agentes sólidos, líquidos o gaseosos que desprendan carbono; este último caso es el que más se utiliza en la práctica, ya que permite un control más preciso del tratamiento. En la atmósfera carburante obtenida por medio de agentes gaseosos el carbono que se difunde en el material procede de la reacción química:



produciéndose la regeneración del monóxido de carbono por combustión parcial de gas natural:



La *nitruración* es también un tratamiento termoquímico que permite, al igual que la cementación, endurecer superficialmente el acero por medio de la incorporación de nitrógeno. La pieza que se pretende nitrurar se somete en un horno a una corriente de amoníaco a una temperatura próxima a 500 °C. En estas condiciones, el amoníaco se encuentra parcialmente disociado según la reacción:



dejando en libertad nitrógeno nascente (N), que es absorbido superficialmente por el acero.

El tratamiento de nitruración se diferencia de la cementación en dos aspectos fundamentales:

- La temperatura a la que se realiza es muy inferior (490-570 °C), lo que evita que se produzcan distorsiones en la estructura del núcleo de la pieza, haciendo innecesario cualquier tratamiento térmico posterior. Antes de la nitruración, las piezas se someten a temple y revenido, cuidando siempre que la temperatura de este último proceso sea superior a la de nitruración, con el fin de evitar un posible ablandamiento posterior del núcleo en el transcurso de la nitruración subsiguiente.

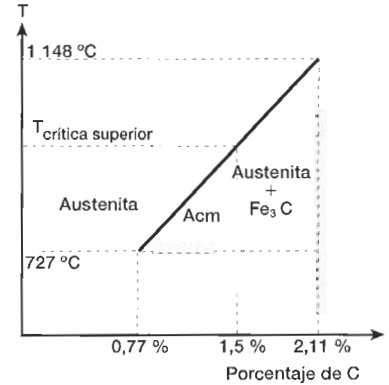
- El nitrógeno no se introduce en el acero en forma de solución sólida, como ocurría en el caso de la cementación, sino que debido a su afinidad por otros elementos químicos (como, por ejemplo, aluminio, cromo, vanadio, volframio o molibdeno) en el acero aleado se forman nitruros submicroscópicos insolubles. Estos nitruros son sustancias extremadamente duras, que se sitúan de forma dispersa en el acero aumentando de forma considerable su dureza superficial. Por otra parte, la presencia de los nitruros origina un aumento local de volumen, que provoca la aparición en las zonas próximas de esfuerzos residuales de compresión que contribuyen al incremento de dureza. La capa nitrurada es más dura que la cementada –se pueden alcanzar durezas comprendidas entre 1100 HV y 650 HV–, y además conserva su dureza hasta temperaturas bastante elevadas, del orden de los 500 °C. Mediante procesos normales de 20 a 80 horas de duración se obtienen capas nitruradas de espesores variables entre 0,2 y 0,7 mm.

15. La *cianuración* es un tratamiento termoquímico de los aceros, que se puede considerar como una carbonitruración que se realiza por medio de baños. La cianuración se emplea no sólo en aceros con bajo contenido en carbono, como sucede en el caso de la cementación, sino también en aceros de contenido medio y alto, que se pretende que adquieran una buena resistencia y dureza superficial.

16. La *perlita* es la estructura resultante de la solidificación de un acero eutectoide. Si el enfriamiento se produce de forma lenta, cada grano de perlita está formado por láminas alternadas de cementita y ferrita; su nombre se debe a las irisaciones, parecidas a las de las perlas, que presenta al ser iluminada. Pero si el enfriamiento tiene lugar de forma rápida la estructura resultante es más borrosa, y se denomina *perlita sorbítica* o *sorbita*. Si la perlita laminar se calienta un poco por debajo de la temperatura crítica de 727 °C, la cementita adopta la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita, y en este caso recibe el nombre de *perlita globular*.

17. Observando el diagrama hierro-carbono, se aprecia que la temperatura crítica inferior de un acero con un 1,5 % de carbono es de **727 °C**

En lo que respecta a la temperatura crítica superior, se puede calcular fácilmente por semejanza de triángulos:



$$\frac{2,11 \% - 0,77 \%}{1148 \text{ }^\circ\text{C} - 727 \text{ }^\circ\text{C}} = \frac{1,5 \% - 0,77 \%}{T_{\text{crítica superior}} - 727 \text{ }^\circ\text{C}}$$

de donde resulta:

$$T_{\text{crítica superior}} = 956 \text{ }^\circ\text{C}$$