

FIGURA 5-2 Difusión de átomos de cobre en el níquel. Finalmente, los átomos de cobre quedarán distribuidos aleatoriamente en todo el níquel.

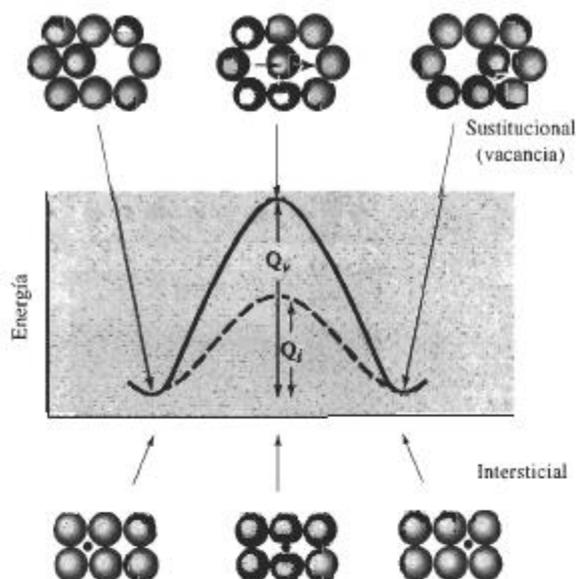


FIGURA 5-3 Mecanismos de difusión en materiales: (a) difusión de átomos por vacancia o por átomos sustitucionales y (b) difusión intersticial.

**Difusión intersticial** Cuando en la estructura cristalina está presente un pequeño átomo intersticial, este átomo pasará de un sitio intersticial a otro. Para este mecanismo no es necesario que existan vacancias. En parte porque el número de sitios intersticiales es mucho mayor que el de vacancias, por tanto, se espera que la difusión intersticial sea rápida.

## 5-4 Energía de activación para la difusión

Un átomo que se difunde debe oprimir a los átomos circundantes para llegar a su nuevo sitio. Para que esto ocurra, deberá proporcionársele energía a fin de que llegue a su nueva posición,



**FIGURA 5-4** Se requiere de una energía alta para hacer pasar los átomos entre otros durante la difusión. Esta energía es la energía de activación  $Q$ . En general, se requiere de más energía en el caso de un átomo sustitucional que en un átomo intersticial.

como se ve de una manera esquemática en la difusión por vacancias e intersticial de la figura 5-4. El átomo originalmente está en una ubicación de baja energía y relativamente estable. A fin de pasar a un nuevo sitio, el átomo debe vencer una barrera energética. La barrera energética es la **energía de activación**  $Q$ . El calor le proporciona al átomo la energía que requiere para vencer esta barrera.

Normalmente se requiere menos energía para hacer pasar un átomo intersticial entre los átomos circundantes; en consecuencia, en la difusión intersticial las energías de activación son menores que en la difusión por vacancias. En la tabla 5-1 se muestran valores típicos de energías de activación; una cifra baja indica una fácil difusión.

## 5-5 Velocidad de difusión (primera ley de Fick)

La velocidad a la cual se difunden los átomos en un material se puede medir mediante el **flujo**  $J$ , que se define como el número de átomos que pasa a través de un plano de superficie unitaria por unidad de tiempo (figura 5-5). La **primera ley de Fick** determina el flujo neto de átomos:

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} \quad (5-3)$$

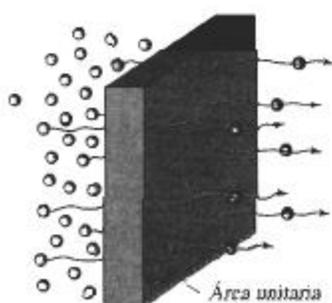
donde  $J$  es el flujo (átomos/cm<sup>2</sup> · s),  $D$  es la **difusividad** o **coeficiente de difusión** (cm<sup>2</sup>/s), y  $\Delta c/\Delta x$  es el **gradiente de concentración** (átomos/cm<sup>3</sup> · cm). Durante la difusión varios factores afectan el flujo de los átomos.

**Gradiente de concentración** El gradiente de concentración muestra la forma en que la composición del material varía con la distancia;  $\Delta c$  es la diferencia en concentración a lo largo de una distancia  $\Delta x$  (figura 5-6). El gradiente de concentración puede crearse al poner en

TABLA 5-1 Datos de difusión para materiales seleccionados

Par de difusión	$Q$ (cal/mol)	$D_0$ ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
<b>Difusión intersticial:</b>		
C en hierro CCC	32,900	0.23
C en hierro CC	20,900	0.011
N en hierro CCC	34,600	0.0034
N en hierro CC	18,300	0.0047
H en hierro CCC	10,300	0.0063
H en hierro CC	3,600	0.0012
<b>Autodifusión (difusión por vacancias):</b>		
Pb en Pb CCC	25,900	1.27
Al en Al CCC	32,200	0.10
Cu en Cu CCC	49,300	0.36
Fe en Fe CCC	66,700	0.65
Zn en Zn HC	21,800	0.1
Mg en Mg HC	32,200	1.0
Fe en Fe CC	58,900	4.1
W en W CC	143,300	1.88
Si en Si (covalente)	110,000	1800.0
C en C (covalente)	163,000	5.0
<b>Difusión heterogénea (difusión por vacancias):</b>		
Ni en Cu	57,900	2.3
Cu en Ni	61,500	0.65
Zn en Cu	43,900	0.78
Ni en hierro CCC	64,000	4.1
Au en Ag	45,500	0.26
Ag en Au	40,200	0.072
Al en Cu	39,500	0.045
Al en $\text{Al}_2\text{O}_3$	114,000	28.0
O en $\text{Al}_2\text{O}_3$	152,000	1900.0
Mg en MgO	79,000	0.249
O en MgO	82,100	0.000043

De diversas fuentes, incluyendo Y. Adda y J. Philibert, *La Diffusion dans les Solides*, Vol. 2, 1966.



**FIGURA 5-5** El flujo durante la difusión queda definido como el número de átomos que pasa a través de un plano de área unitaria por unidad de tiempo.

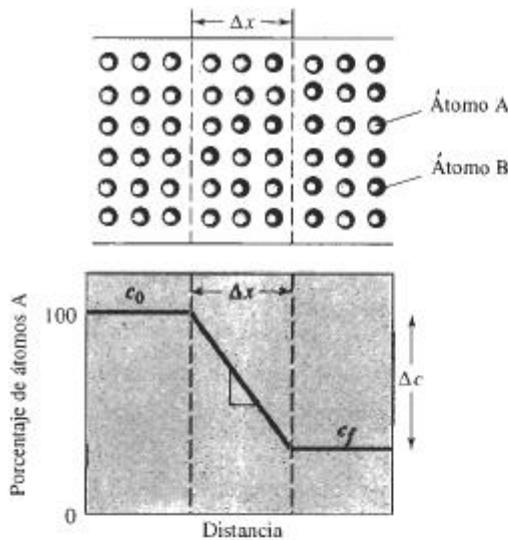


FIGURA 5-6 Ilustración del gradiente de concentración.

contacto dos materiales de composición distinta cuando un gas o un líquido entra en contacto con un material sólido, cuando se producen estructuras fuera de equilibrio en un material debido al procesamiento y por toda una serie de otras causas.

El flujo a una temperatura en particular es constante sólo si también es constante el gradiente de concentración, esto es, las composiciones a cada lado del plano de la figura 5-5 se conservan sin modificación. En muchos casos prácticos, sin embargo, estas composiciones varían al irse redistribuyendo los átomos, por lo que también el flujo cambia. A menudo encontramos que el flujo es inicialmente alto y después se reduce gradualmente, conforme disminuye el gradiente de concentración por difusión.

### EJEMPLO 5-2

Una manera de fabricar transistores, que amplifican señales eléctricas, es la difusión de átomos de impurezas en un material semiconductor como el silicio. Imagine que una oblea de silicio de un espesor de 0.1 cm, que originalmente contiene un átomo de fósforo por cada 10,000,000 de átomos de Si, es tratada de forma que en su superficie existan 400 átomos de P por cada 10,000,000 de Si (figura 5-7). Calcule el gradiente de concentración (a) en porcentaje atómico/cm y (b) en átomos/cm<sup>3</sup> · cm. El parámetro de red del silicio es 5.4307 Å.

### SOLUCIÓN

Primero, calculemos las concentraciones iniciales y superficiales en porcentaje atómico:

$$c_i = \frac{\text{átomo de P}}{10,000,000 \text{ átomos}} \times 100 = 0.00001 \% \text{ atómico de P}$$

$$c_s = \frac{400 \text{ átomos de P}}{10,000,000 \text{ átomos}} \times 100 = 0.004 \% \text{ atómico de P}$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0.00001 - 0.004 \% \text{ atómico de P}}{0.1 \text{ cm}} = -0.0399 \% \text{ atómico de P/cm}$$

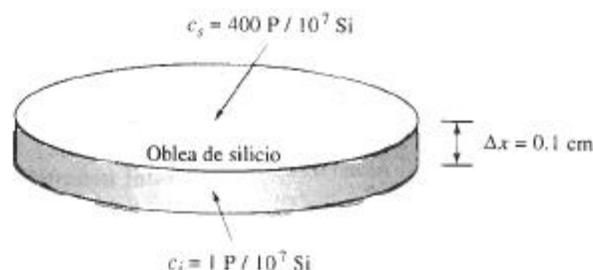


FIGURA 5-7 Oblea de silicio (para ejemplo 5-2).

Para encontrar el gradiente en función de átomos/cm<sup>3</sup> · cm, debemos determinar el volumen de la celda unitaria:

$$V_{\text{celda}} = (5.4307 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 = 1.6 \times 10^{-22} \text{ cm}^3/\text{celda}$$

El volumen ocupado por 10,000,000 de átomos de Si, que están organizados en una estructura CD, con ocho átomos por celda, es:

$$V = \frac{10,000,000 \text{ átomos}}{8 \text{ átomos/celda}} (1.6 \times 10^{-22} \text{ cm}^3/\text{celda}) = 2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3$$

Las composiciones en átomos/cm<sup>3</sup> son:

$$c_i = \frac{\text{átomo de P}}{2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3} = 0.005 \times 10^{18} \text{ átomos de P/cm}^3$$

$$c_s = \frac{400 \text{ átomos de P}}{2 \times 10^{-16} \text{ cm}^3} = 2 \times 10^{18} \text{ átomos de P/cm}^3$$

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0.005 \times 10^{18} - 2 \times 10^{18} \text{ átomos de P/cm}^3}{0.1 \text{ cm}}$$

$$= -1.995 \times 10^{19} \text{ átomos de P/cm}^3 \cdot \text{cm}$$

### EJEMPLO 5-3

Una capa de 0.05 cm de MgO se deposita entre capas de níquel y de tantalio para que funcione como una barrera contra la difusión que impida reacciones entre los dos metales (figura 5-8). A 1400°C se crean iones de níquel que se difunden a través del material cerámico MgO para llegar al tantalio. Determine el número de iones de níquel que pasan a través del MgO por segundo. El coeficiente de difusión del níquel en el MgO es de  $9 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ , y el parámetro de red del níquel a 1400°C es de  $3.6 \times 10^{-8} \text{ cm}$ .

### SOLUCIÓN

La concentración del Ni en la interfase Ni/MgO es 100% Ni, es decir:

$$c_{\text{NiMgO}} = \frac{4 \text{ átomos de Ni/celda unitaria}}{(3.6 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 8.57 \times 10^{22} \text{ átomos/cm}^3$$

La concentración del níquel en la interfase Ta/MgO es 0% Ni. Por lo que el gradiente de concentración es:

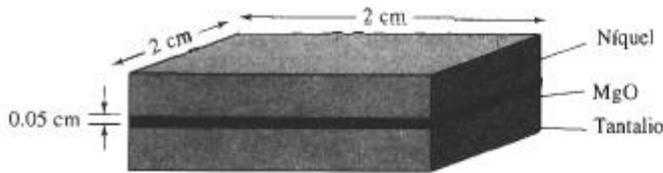


FIGURA 5-8 Par de difusión (para el ejemplo 5-3).

$$\Delta c/\Delta x = \frac{0 - 8.57 \times 10^{22} \text{ átomos/cm}^3}{0.05 \text{ cm}} = -1.71 \times 10^{24} \text{ átomos/cm}^3 \cdot \text{cm}$$

El flujo de átomos de níquel a través de la capa MgO es de:

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} = (9 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s})(-1.71 \times 10^{24} \text{ átomos/cm}^3 \cdot \text{cm})$$

$$J = 1.54 \times 10^{13} \text{ átomos de níquel/cm}^2 \cdot \text{s}$$

El número total de átomos de níquel cruzando la interfase de 2 cm × 2 cm por segundo es:

$$\begin{aligned} \text{Átomos de Ni totales} &= (J)(\text{Área}) = (1.54 \times 10^{13})(2 \text{ cm})(2 \text{ cm}) \\ &= 6.16 \times 10^{13} \text{ átomos de Ni/s} \end{aligned}$$

Aunque esto pudiera parecer muy rápido, encontraríamos que en un segundo, el volumen de átomos de níquel eliminados de la interfase Ni/MgO sería de

$$\frac{6.16 \times 10^{13} \text{ átomos de Ni/s}}{8.57 \times 10^{22} \text{ átomos de Ni/cm}^3} = 0.72 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$$

O bien, el espesor que se reduce en la capa de níquel cada segundo es de

$$\frac{0.72 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}}{4 \text{ cm}^2} = 1.8 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$$

Para eliminar el espesor de níquel en una micra ( $10^{-4}$  cm), el tratamiento requiere

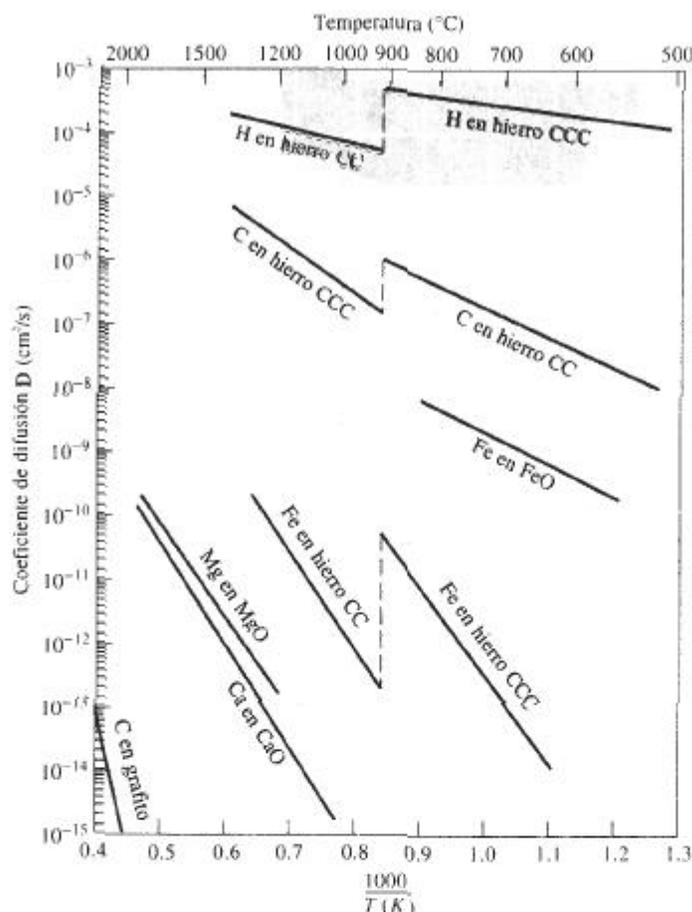
$$\frac{10^{-4} \text{ cm}}{1.8 \times 10^{-10} \text{ cm/s}} = 556,000 \text{ s} = 154 \text{ h}$$

**El coeficiente de difusión y la temperatura** El coeficiente de difusión  $D$  está relacionado con la temperatura a través de una ecuación de Arrhenius,

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right), \quad (5-4)$$

donde  $Q$  es la energía de activación (cal/mol),  $R$  es la constante de los gases (1.987 cal/mol · K) y  $T$  es la temperatura absoluta (K).  $D_0$  es una constante para un sistema de difusión dado. Los valores típicos de  $D_0$  se indican en la tabla 5-1, en tanto que la dependencia de  $D$  con la temperatura para varios metales se ilustra en la figura 5-9.

Cuando se incrementa la temperatura de un material, también se incrementa el coeficiente de difusión y el flujo de átomos. A temperaturas más altas, la energía térmica suministrada a los átomos en difusión permite que éstos venzan la barrera de energía de activación y se muevan con mayor facilidad a nuevos sitios en la red. A bajas temperaturas, frecuentemente por debajo de aproximadamente 0.4 veces la temperatura de fusión absoluta del material, la difusión es muy baja y puede no ser significativa. Por esta razón, el tratamiento térmico de metales y el procesamiento de cerámicos se efectúa a altas temperaturas; así los átomos se mueven rápidamente para completar reacciones o para llegar a condiciones de equilibrio.



**FIGURA 5-9** Coeficiente de difusión  $D$  en función del recíproco de la temperatura para varios metales y materiales cerámicos. En esta gráfica de Arrhenius,  $D$  representa la rapidez del proceso de difusión. Una pendiente pronunciada significa una energía de activación elevada.

#### EJEMPLO 5-4 Diseño de una membrana de hierro

Un tubo grueso, impermeable, de 3 cm de diámetro y de 10 cm de largo contiene un gas que incluye  $0.5 \times 10^{20}$  átomos N por  $\text{cm}^3$  y  $0.5 \times 10^{20}$  átomos H por  $\text{cm}^3$  en un lado de una membrana de hierro (figura 5-10). A fin de asegurar una concentración constante de nitrógeno e hidrógeno, se introduce gas en el tubo de manera continua. El gas del otro lado de la membrana tiene constantemente  $1 \times 10^{18}$  átomos de N por  $\text{cm}^3$  y  $1 \times 10^{18}$  átomos H por  $\text{cm}^3$ . Todo el sistema debe operar a  $700^\circ\text{C}$ , temperatura a la cual el hierro tiene estructura CC. Diseñe una membrana de hierro que impida la pérdida de 1% de nitrógeno cada hora y al mismo tiempo que permita el paso del 90% de hidrógeno por hora a través de ella.

#### SOLUCIÓN

El número total de átomos de nitrógeno en el recipiente es:

$$(0.5 \times 10^{20} \text{ átomos de N/cm}^3)(\pi/4)(3 \text{ cm})^2(10 \text{ cm}) = 35.343 \times 10^{20} \text{ átomos de N}$$

El número máximo de átomos por pérdida no debe exceder el 1% del total, es decir:

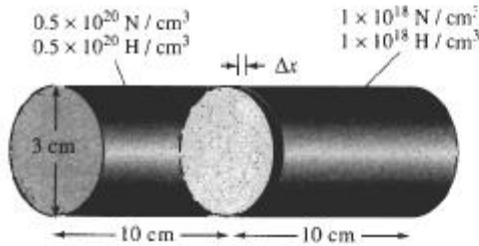


FIGURA 5-10 Membrana de hierro (para el ejemplo 5-4).

$$\begin{aligned} \text{Pérdida de átomos de N por h} &= (0.01)(5.34 \times 10^{20}) = 35.343 \times 10^{18} \text{ átomos de N/h} \\ \text{Pérdida de átomos de N por s} &= (35.343 \times 10^{18} \text{ átomos de N/h}) / (3600 \text{ s/h}) \\ &= 0.0098 \times 10^{18} \text{ átomos de N/s} \end{aligned}$$

El flujo es entonces

$$\begin{aligned} J &= \frac{(0.0098 \times 10^{18} \text{ átomos de N/s})}{\left(\frac{\pi}{4}\right)(3\text{cm})^2} \\ &= 0.00139 \times 10^{18} \text{ átomos de N/cm}^2 \cdot \text{s} \end{aligned}$$

El coeficiente de difusión del nitrógeno en el hierro CC a 700°C = 973 K es:

$$\begin{aligned} D_N &= 0.0047 \exp(-18,300/RT) = 0.0047 \exp[-18,300/(1.987)(973)] \\ &= 0.0047 \exp(-9.4654) = (0.0047)(7.749 \times 10^{-5}) = 3.64 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s} \end{aligned}$$

De la ecuación 5-3:

$$\begin{aligned} J &= -D\Delta c/\Delta x = 0.00139 \times 10^{18} \text{ átomos de N/cm}^2 \cdot \text{s} \\ \Delta x &= -D\Delta c/J = \frac{(-3.64 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s})(1 \times 10^{18} - 50 \times 10^{18} \text{ N/cm}^3)}{0.00139 \times 10^{18} \text{ N/cm}^2 \cdot \text{s}} \end{aligned}$$

$$\Delta x = 0.0128 \text{ cm} = \text{espesor mínimo de la membrana}$$

De manera similar, el espesor máximo de la membrana, que permitirá que pase el 90% del hidrógeno puede calcularse de la siguiente forma:

$$\text{Pérdidas de átomos de H por h} = (0.90)(35.343 \times 10^{18}) = 31.80 \times 10^{18}$$

$$\text{Pérdidas de átomos de H por s} = 0.0088 \times 10^{20}$$

$$J = 0.125 \times 10^{18} \text{ átomos de H/cm}^2 \cdot \text{s}$$

$$D_H = 0.0012 \exp(-3600/RT) = 1.86 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$$

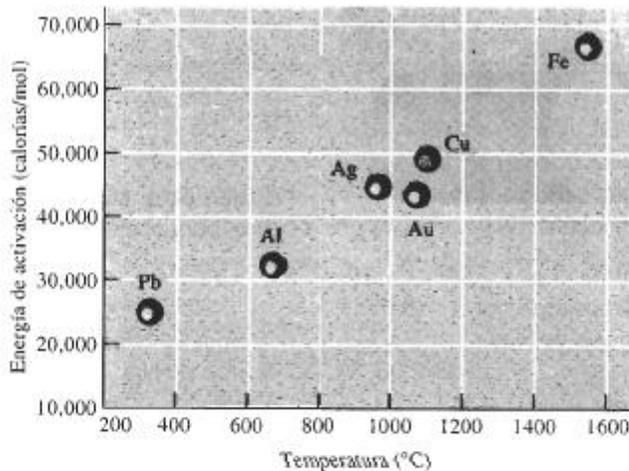
$$\Delta x = \frac{(1.86 \times 10^{-4})(49 \times 10^{18})}{0.125 \times 10^{18}} = 0.0729 \text{ cm} = \text{espesor máximo}$$

Será suficiente una membrana de hierro de un espesor entre 0.0128 y 0.0729 cm. ■

**Factores que afectan la difusión y la energía de activación** Una pequeña cantidad de energía de activación  $Q$  incrementa el coeficiente de difusión y el flujo, porque se requiere menos energía térmica para vencer dicha barrera de energía de activación. Varios factores influyen en la energía de activación y, por tanto, en la velocidad de difusión. La **difusión intersticial**, con una energía de activación baja, por lo general ocurre mucho más aprisa que la difusión por vacancias o sustitucional.

Las energías de activación por lo general son menores para átomos difundiendo a través de estructuras cristalinas abiertas que a través de estructuras cristalinas compactas. Dado que la energía de activación depende de la fuerza del enlace atómico, será mayor para la difusión de átomos en materiales con una alta temperatura de fusión (figura 5-11). Los materiales con enlaces covalentes, como el carbono y el silicio (tabla 5-1) tienen energías de activación extraordinariamente altas, lo que es congruente con la alta resistencia de sus enlaces atómicos.

En los materiales de enlace iónico, como los materiales cerámicos, un ion que se difunda sólo ocupará un sitio que tenga su misma carga. A fin de llegar a dicho sitio, el ion físicamen-



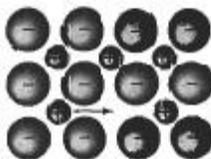
**FIGURA 5-11** La energía de activación para la autodifusión es mayor conforme aumenta el punto de fusión del metal.

te deberá abrirse paso entre los iones adyacentes, pasar por una región de carga opuesta y moverse una distancia relativamente larga (figura 5-12). En consecuencia, las energías de activación son mayores y las velocidades de difusión menores para materiales iónicos que para los metales.

También encontramos que, debido a su menor tamaño, los cationes (con carga positiva) a menudo tienen coeficientes de difusión más altos que los aniones (con carga negativa). En el cloruro de sodio, por ejemplo, la energía de activación para la difusión de los iones de cloro es de aproximadamente el doble que la correspondiente a la difusión de los iones sodio.

La difusión de los iones también significa una transferencia de cargas eléctricas; de hecho, la conductividad eléctrica de los materiales cerámicos de enlace iónico está relacionada con la temperatura a través de una ecuación de Arrhenius. Conforme la temperatura se incrementa, los iones se difunden con mayor rapidez, la carga eléctrica se transfiere más rápido y la conductividad eléctrica aumenta.

En los polímeros nos encontramos con la difusión de átomos o de pequeñas moléculas entre largas cadenas poliméricas. Por ejemplo, generalmente se usan películas de polímeros como material de empaque para almacenar alimentos. Si se difunde el aire a través de la película, los alimentos se deterioran. Si el aire se difunde a través de la cámara de hule de una llanta de automóvil, ésta perderá su presión. La difusión de algunas moléculas en un polímero podría causar problemas de hinchazón. Por otra parte, se requiere la difusión para permitir que los tintes se introduzcan de manera uniforme en muchos de los tejidos sintéticos de polímeros. La difusión selectiva a través de membranas de polímeros se utiliza para obtener la desalinización del agua: en tanto que las moléculas de agua pasarán a través de la membrana, los iones de la sal quedarán atrapados.



**FIGURA 5-12** Difusión en compuestos de enlace iónico. Los aniones solamente pueden ocupar otros sitios de anión.

**TABLA 5-2** Efecto del tipo de difusión para el torio en tungsteno y para la autodifusión en la plata

Tipo de difusión	Coeficiente de difusión	
	Torio en tungsteno	Plata en plata
En superficie	$0.47 \exp(-66,400/RT)$	$0.068 \exp(-8,900/RT)$
En borde de grano	$0.74 \exp(-90,000/RT)$	$0.24 \exp(-22,750/RT)$
En volumen	$1.00 \exp(-120,000/RT)$	$0.99 \exp(-45,700/RT)$

En cada uno de estos ejemplos, los átomos, iones o moléculas en difusión penetran entre las cadenas de polímeros en vez de moverse de un sitio a otro dentro de la estructura de la cadena. La difusión será más rápida a través de esta estructura mientras más pequeño sea el elemento en difusión o si entre cadenas hay grandes huecos. La difusión a través de polímeros cristalinos, por ejemplo, es más lenta que a través de los amorfos, ya que estos últimos no tienen orden de largo alcance y en consecuencia tienen menor densidad.

**Tipos de difusión** En la **difusión volumétrica**, los átomos se mueven a través del cristal de un sitio de red, o de un sitio intersticial, a otro. Debido a la presencia de los átomos adyacentes, la energía de activación es grande y la velocidad de difusión relativamente lenta.

Sin embargo, los átomos también se pueden difundir a lo largo de fronteras o bordes, interfaces y superficies del material. Los átomos se difunden fácilmente mediante **difusión en los bordes de grano** ya que en éstos la compactación atómica no es buena. Debido a que los átomos pueden pasar con mayor facilidad a través del borde de grano mal organizado, la energía de activación es baja (tabla 5-2). La **difusión en superficies** es aún más fácil, porque en las superficies existen incluso menos restricciones para los átomos a difundir.

**Tiempo** La difusión requiere tiempo; las unidades para el flujo son átomos/cm<sup>2</sup> · s. Si un gran número de átomos debe difundir para producir una estructura uniforme, pudieran requerirse extensos períodos, incluso a temperaturas altas. Puede reducirse el tiempo para los tratamientos térmicos mediante temperaturas más altas o haciendo que las **distancias de difusión** (relacionadas con  $\Delta x$ ) sean lo más pequeñas posible.

Encontramos que si evitamos la difusión obtendremos algunas estructuras y propiedades bastante notables. Los aceros rápidamente enfriados desde altas temperaturas, a fin de evitar la difusión, forman estructuras fuera de equilibrio que son la base de tratamientos térmicos sofisticados.

### EJEMPLO 5-5

Considere un par de difusión establecido entre el tungsteno puro y una aleación de tungsteno con 1% atómico de torio. Después de varios minutos de exposición a 2000°C, se establece una zona de transición con 0.01 cm de espesor. ¿Cuál es el flujo de los átomos de torio en ese momento, si la difusión se debe a (a) difusión volumétrica, (b) difusión por bordes de grano y (c) difusión en superficies? (tabla 5-2).

### SOLUCIÓN

El parámetro de red del tungsteno CC es de aproximadamente 3.165 Å. Por lo que el número de átomos de tungsteno/cm<sup>3</sup> es:

$$\frac{\text{átomos de W}}{\text{cm}^3} = \frac{2 \text{ átomos/celda}}{(3.165 \times 10^{-8})^3 \text{ cm}^3/\text{celda}} = 6.3 \times 10^{22}$$

En la aleación de tungsteno con 1% at de torio el número de átomos de torio es:

$$c_{\text{Th}} = (0.01)(6.3 \times 10^{22}) = 6.3 \times 10^{20} \text{ átomos Th/cm}^3$$

En el tungsteno puro, el número de átomos de torio es cero. Por lo que el gradiente de concentración es:

$$\frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{0 - 6.3 \times 10^{20}}{0.01 \text{ cm}} = -6.3 \times 10^{22} \text{ átomos de Th/cm}^3 \cdot \text{cm}$$

1. Difusión volumétrica:

$$D = 1.0 \exp\left(\frac{-120,000}{(1.987)(2273)}\right) = 2.89 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta x} = -(2.89 \times 10^{-12})(-6.3 \times 10^{22}) \\ = 18.2 \times 10^{10} \text{ átomos de Th/cm}^2 \cdot \text{s}$$

2. Difusión en bordes de grano:

$$D = 0.74 \exp\left(\frac{-90,000}{(1.987)(2273)}\right) = 1.64 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = -(1.64 \times 10^{-9})(-6.3 \times 10^{22}) = 10.3 \times 10^{13} \text{ átomos de Th/cm}^2 \cdot \text{s}$$

3. Difusión en superficies:

$$D = 0.47 \exp\left(\frac{-66,400}{(1.987)(2273)}\right) = 1.94 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$J = -(1.94 \times 10^{-7})(-6.3 \times 10^{22}) = 12.2 \times 10^{15} \text{ átomos de Th/cm}^2 \cdot \text{s}$$

## 5-6 Perfil de composición (segunda ley de Fick)

La **segunda ley de Fick**, que describe el estado dinámico de la difusión de los átomos, es la ecuación diferencial  $dc/dt = D(d^2c/dx^2)$ , cuya solución depende de las condiciones a la frontera para una situación en particular. Una solución de esta ecuación es:

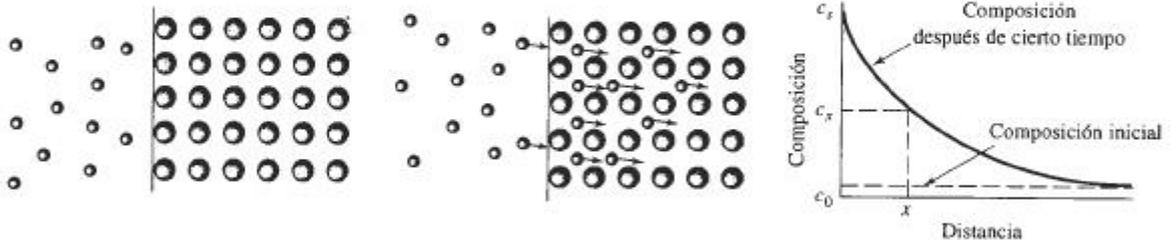
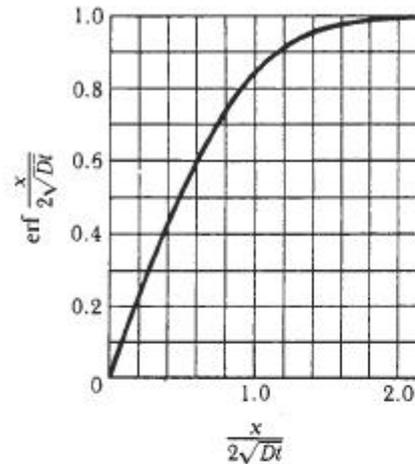
$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} \approx \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (5-5)$$

donde  $c_s$  es la concentración constante de los átomos a difundir en la superficie del material,  $c_0$  es la concentración inicial en el material de los átomos a difundir y  $c_x$  es la concentración del átomo en difusión en una posición  $x$  por debajo de la superficie después de un tiempo  $t$ . Estas concentraciones se ilustran en la figura 5-13. A la función erf se le conoce como la función error y se puede evaluar a partir de la tabla 5-3.

La solución a la segunda ley de Fick nos permite calcular la concentración de una de las especies en difusión cerca de la superficie del material en función del tiempo y la distancia, siempre y cuando el coeficiente de difusión  $D$  permanezca constante y las concentraciones del átomo en difusión en la superficie  $c_s$  y dentro del material  $c_0$  se mantengan sin modificación. La segunda ley de Fick también puede ayudarnos a diseñar una diversidad de técnicas de procesamiento de materiales, incluyendo el tratamiento térmico del acero descrito en el ejemplo 5-6.

**TABLA 5-3** Función error correspondiente a la segunda ley de Fick

$\frac{x}{2\sqrt{Dt}}$	$\text{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$
0	0
0.10	0.1125
0.20	0.2227
0.30	0.3286
0.40	0.4284
0.50	0.5205
0.60	0.6039
0.70	0.6778
0.80	0.7421
0.90	0.7970
1.00	0.8427
1.50	0.9661
2.00	0.9953



**FIGURA 5-13** Difusión de átomos en la superficie de un material, ilustrando el uso de la segunda ley de Fick.

### EJEMPLO 5-6

### Diseño de un tratamiento de carburización

La superficie de un acero que contiene 0.1% de carbono debe endurecerse por carburización. En la carburización, el acero se coloca en una atmósfera que le proporcionará 1.2% de C en la superficie a temperatura elevada. El carbono se difunde desde la superficie hacia el interior del acero. Para conseguir propiedades óptimas, el acero debe contener 0.45% de C a una profundidad de 0.2 cm por debajo de la superficie. Diseñe el tratamiento térmico de carburización para producir estas propiedades. Suponga que la temperatura es lo suficientemente alta (por lo menos 900°C) de manera que el hierro tenga una estructura CCC.

### SOLUCIÓN

Sabemos que  $c_1 = 1.2\%$  C,  $c_0 = 0.1\%$  C,  $c_x = 0.45\%$  C y  $x = 0.2$  cm. Partiendo de la segunda ley de Fick:

$$\frac{c_1 - c_x}{c_1 - c_0} = \frac{1.2 - 0.45}{1.2 - 0.1} = 0.68 = \text{erf} \left( \frac{0.2}{2\sqrt{Dt}} \right) = \text{erf} \left( \frac{0.1}{\sqrt{Dt}} \right)$$

De la tabla 5-3, encontramos que:

$$\frac{0.1}{\sqrt{Dt}} = 0.71 \quad \text{de} \quad Dt = \left(\frac{0.1}{0.71}\right)^2 = 0.0198$$

Cualquier combinación de  $D$  y  $t$  cuyo producto sea 0.0198 funcionará. En el caso de difusión de carbono en hierro CCC, el coeficiente de difusión está relacionado con la temperatura según:

$$D = 0.23 \exp\left(\frac{-32,900}{1.987T}\right) = 0.23 \exp\left(\frac{-16,558}{T}\right)$$

Por tanto, la temperatura y el tiempo del tratamiento térmico están relacionados mediante:

$$t = \frac{0.0198}{D} = \frac{0.0198}{0.23 \exp(-16,558/T)} = \frac{0.0861}{\exp(-16,558/T)}$$

Algunas combinaciones típicas de temperatura y tiempo son:

Si  $T = 900^\circ\text{C} = 1173 \text{ K}$ , entonces  $t = 116,174 \text{ s} = 32.3 \text{ h}$

Si  $T = 1000^\circ\text{C} = 1273 \text{ K}$ , entonces  $t = 36,360 \text{ s} = 10.7 \text{ h}$

Si  $T = 1100^\circ\text{C} = 1373 \text{ K}$ , entonces  $t = 14,880 \text{ s} = 4.13 \text{ h}$

Si  $T = 1200^\circ\text{C} = 1473 \text{ K}$ , entonces  $t = 6,560 \text{ s} = 1.82 \text{ h}$

La combinación exacta de tiempo y temperatura dependerá de la temperatura máxima que pueda alcanzar el horno de tratamiento térmico, la velocidad a la cual deben producirse los componentes, y la relación costo-beneficio entre las temperaturas altas en comparación con tiempos más largos. ■

El ejemplo 5-6 muestra que una de las consecuencias de la segunda ley de Fick es que se puede obtener el mismo perfil de concentración mediante condiciones distintas, siempre y cuando el término  $Dt$  sea constante. Esto nos permite determinar el efecto que tiene la temperatura sobre el tiempo requerido para que se lleve a cabo un tratamiento térmico en particular.

### EJEMPLO 5-7 Diseño de un tratamiento térmico más económico

Encontramos que se necesitan 10 horas a  $900^\circ\text{C}$  para carburizar con éxito un lote de 500 engranes de acero, en estas circunstancias el hierro tiene una estructura CCC. Se sabe que operar el horno de carburización a  $900^\circ\text{C}$  cuesta \$1000 por hora. ¿Es económico incrementar la temperatura de carburización a  $1000^\circ\text{C}$ ?

### SOLUCIÓN

Las temperaturas de interés son  $900^\circ\text{C} = 1173 \text{ K}$  y  $1000^\circ\text{C} = 1273 \text{ K}$ . Para la difusión del carbono en hierro CCC, la energía de activación es 32,900 cal/mol. Para conseguir el mismo tratamiento de carburización a  $1000^\circ\text{C}$  que el que se consigue a  $900^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} D_{1273} t_{1273} &= D_{1173} t_{1173} \\ t_{1273} &= \frac{D_{1173} t_{1173}}{D_{1273}} = \frac{(10 \text{ h}) \exp[-32,900/(1.987)(1173)]}{\exp[-32,900/(1.987)(1273)]} \\ t_{1273} &= \frac{(10) \exp(-14.11562)}{\exp(-13.00677)} = (10) \exp(-1.10885) = (10)(0.3299) \\ t_{1273} &= 3.299 \text{ h} \end{aligned}$$

A 900°C, el costo por pieza es  $(\$1000/h)(10\text{ h})/500\text{ partes} = \$20$  por pieza.

A 1000°C, el costo por componente es  $(\$1500/h)(3.299\text{ h})/500\text{ componentes} = \$9.90$  por pieza.

Tomando en consideración sólo el costo de operación del horno, el incrementar la temperatura reduce el costo de tratamiento térmico de los engranes y aumenta la velocidad de producción. ■

La ecuación 5-5 exige que exista una composición constante  $c^0$  en la interfase; esto es cierto en un proceso como la carburización del acero (ejemplo 5-6), en el cual continuamente se suministra carbono a la superficie del metal. En muchos casos, sin embargo, la concentración en la superficie cambia gradualmente durante el proceso. En estos casos, ocurre la **interdifusión** de los átomos, según se observa en la figura 5-2 y la ecuación 5-5 ya no es válida.

Algunas veces la interdifusión puede causar dificultades. Por ejemplo, cuando se une el aluminio al oro a una temperatura elevada, los átomos de aluminio se difunden más aprisa en el oro que los de oro en el aluminio. En consecuencia, finalmente habrá más átomos totales en el lado del oro que en el lado del aluminio. Esto hace que la posición física de la interfase original se desplace hacia el lado del aluminio. Cualquier materia extraña originalmente atrapada en la interfase también se desplazará con ésta. Este movimiento, debido a las velocidades de difusión distintas, se conoce como **efecto Kirkendall**.

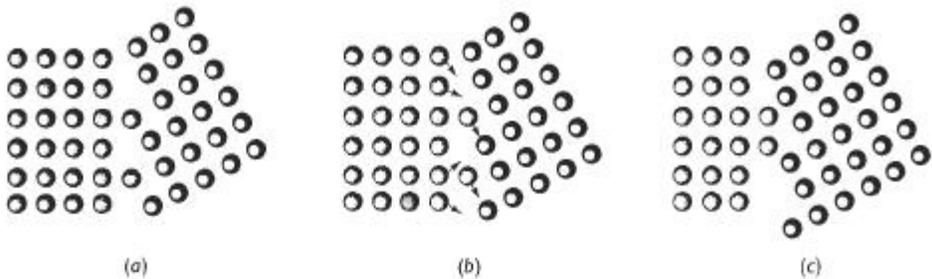
En algunos casos, como resultado del efecto Kirkendall se formarán poros en la interfase. En circuitos integrados de pequeñas dimensiones, el alambre de oro es soldado al aluminio para obtener una terminal externa del circuito. Durante la operación del circuito, pueden formarse poros al irse uniendo las vacancias involucradas en el proceso de difusión; conforme estos poros crecen, la conexión Au-Al se va debilitando y finalmente puede fallar. Como el área alrededor de la conexión cambia de color, esta falla prematura se conoce como **plaga púrpura**. Una técnica para evitar este problema es exponiendo la junta soldada al hidrógeno, el cual se disuelve en el aluminio, llena las vacancias e impide la autodifusión de los átomos de aluminio en el oro y que se fragilice la soldadura.

## 5-7 Difusión y el procesamiento de los materiales

Los procesos a base de difusión son muy importantes cuando se utilizan o procesan materiales a temperaturas elevadas (en capítulos posteriores se analizarán muchos ejemplos de importancia). En esta sección se verán tres casos en los cuales la difusión es importante.

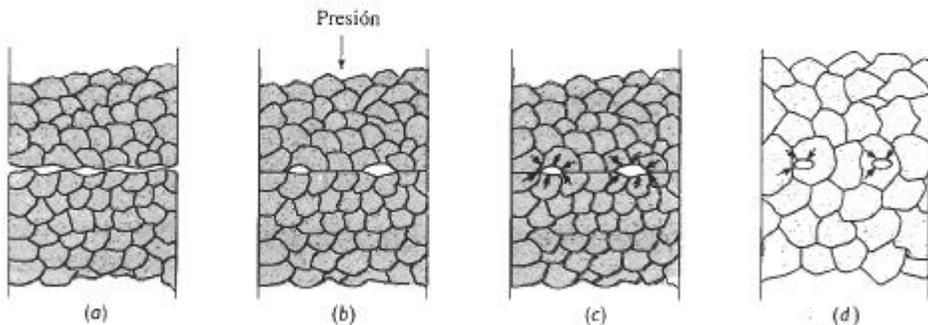
**Crecimiento de grano** Un material compuesto por gran número de granos tiene muchos bordes de grano, que representan áreas de alta energía, debido a una ineficiente compactación de los átomos. Si se reduce el área total de bordes de grano mediante el crecimiento de los mismos, se tendrá en el material una energía general inferior.

El **crecimiento de los granos** implica el desplazamiento de los bordes de grano, permitiendo que algunos granos crezcan a costa de otros. En este caso los átomos se difunden a través de los bordes de grano (figura 5-14) y, en consecuencia, el crecimiento de los granos está relacionado con la energía de activación necesaria para que un átomo salte a través del borde de grano. Altas temperaturas o bajas energías de activación incrementarán el tamaño de los granos. Muchos tratamientos térmicos de los metales, que implican mantener el metal a una temperatura alta, deben controlarse cuidadosamente, a fin de evitar un crecimiento excesivo de los granos.



**FIGURA 5-14** El crecimiento de grano ocurrirá cuando los átomos se difundan a través del borde de grano de un grano a otro.

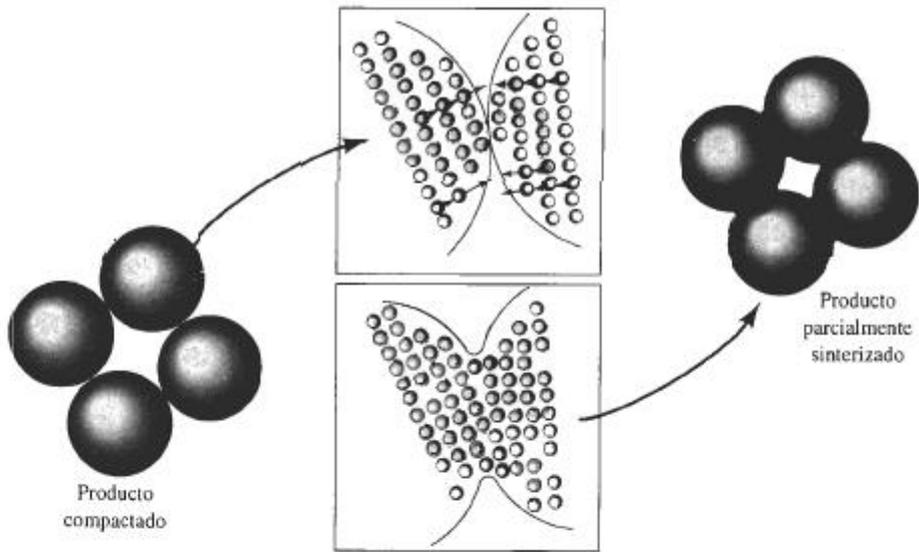
**Soldadura por difusión** La **soldadura por difusión**, método utilizado para unir materiales, se efectúa en tres pasos (figura 5-15). El primero se realiza mediante presión, deformándolas, obligando a las dos superficies a unirse, fragmentando impurezas, y produciendo una gran área de contacto átomo-átomo. Mientras las superficies se mantienen en compresión y a temperatura elevada, los átomos se difunden a lo largo de los bordes de grano hacia las vacancias restantes; los átomos se concentran y se reduce el tamaño de las vacancias en la interfase. Dado que la difusión en los bordes de grano sucede rápidamente, el segundo paso se da en corto tiempo. Finalmente, el crecimiento de grano aleja los huecos remanentes de las fronteras de grano. Para el tercer paso, es decir para la eliminación completa de los huecos, deberá ocurrir la difusión volumétrica, misma que es relativamente lenta.



**FIGURA 5-15** Pasos en la soldadura por difusión: (a) inicialmente el área de contacto es pequeña; (b) la aplicación de presión deforma la superficie, incrementando el área de unión; (c) la difusión por bordes de grano da como resultado la contracción de los huecos y (d) la eliminación final de los huecos requiere de la difusión volumétrica.

A menudo el proceso de soldadura por difusión es utilizado para unir metales reactivos como el titanio, para unir metales y materiales distintos y para unir cerámicos.

**Sinterización** Un cierto número de materiales se manufacturan en formas útiles mediante un proceso que requiere la consolidación de pequeñas partículas en una masa sólida. La **sinterización** es un tratamiento a alta temperatura, que hace que las partículas se unan y de manera gradual se reduzca el volumen del espacio de los poros entre las mismas. La sinterización es un paso frecuente en la fabricación de componentes cerámicos, así como en la producción de componentes metálicos mediante la **metalurgia de polvos**. Una diversidad de materiales compuestos se producen utilizando esta misma técnica.



**FIGURA 5-16** Procesos de difusión durante el sinterizado y la metalurgia de polvos. Los átomos se difunden hacia los puntos de contacto, creando puentes y reduciendo el tamaño de los poros.

Cuando polvo de un material se compacta para obtener una preforma, las partículas de polvo entran en contacto en muchos puntos aunque con una cantidad significativa de poros entre ellas. A fin de reducir la energía superficial existente en las partículas, los átomos se difunden hacia los puntos de contacto, permitiendo que las partículas queden unidas y finalmente haciendo que los poros se contraigan. Si el sinterizado se efectúa durante un tiempo prolongado, pueden eliminarse los poros y el material se hace denso (figura 5-16). La velocidad de la sinterización depende de la temperatura, de la energía de activación y del coeficiente de difusión para la difusión, así como del tamaño original de las partículas.

## RESUMEN

Los átomos se mueven mediante mecanismos de difusión a través de un material sólido, particularmente a temperaturas elevadas y estando presente un gradiente de concentración. Algunas relaciones clave que implican difusión son las siguientes:

- *Dos mecanismos de importancia para el movimiento de los átomos son la difusión por vacancias y la difusión intersticial. Los átomos sustitucionales se mueven en la red gracias al mecanismo de difusión por vacancias.*
- La velocidad de difusión se rige por la relación de Arrhenius, esto es, la difusión aumenta de manera exponencial al incrementarse la temperatura. La difusión es importante a temperaturas superiores a 0.4 veces la temperatura de fusión del material (en grados Kelvin).
- La energía de activación  $Q$  representa la facilidad con la cual los átomos se difunden, ocurriendo una difusión rápida si la energía de activación es reducida. Se tiene una baja energía de activación y una rápida velocidad de difusión en el caso de (1) difusión intersticial en comparación con la difusión por vacancias, (2) estructuras cristalinas con bajo factor de empaquetamiento, (3) materiales de baja temperatura de fusión o con enlaces atómicos débiles, y (4) difusión a lo largo de bordes o superficies de grano.
- El flujo total de átomos, aumenta cuando se incrementan el gradiente de concentración y el coeficiente de difusión.

- Para un sistema particular, la cantidad de difusión está relacionada con el valor de la expresión  $Dt$ , la cual nos permite determinar el efecto de la temperatura en el tiempo requerido para un proceso controlado por difusión.

La difusión atómica es de importancia primordial para muchas de las técnicas de procesamiento de materiales, como la sinterización, la metalurgia de polvos y la soldadura por difusión. Adicionalmente, muchos de los tratamientos térmicos y de los mecanismos de endurecimiento utilizados para controlar la estructura y las propiedades de los materiales son procesos controlados por difusión. La estabilidad estructural y las propiedades de los materiales durante su uso a altas temperaturas dependen de la difusión. Finalmente, se producen muchos materiales importantes al evitar de manera deliberada la difusión, formando así estructuras fuera del equilibrio. Los capítulos siguientes describen muchos ejemplos en los cuales la difusión juega un papel significativo.

## GLOSARIO

**Autodifusión** Movimiento aleatorio de los átomos dentro de un material puro, esto es, incluso cuando no exista un gradiente de concentración.

**Coefficiente de difusión** Coeficiente dependiente de la temperatura, relacionado con la rapidez a la cual se difunden los átomos. El coeficiente de difusión depende de la temperatura y de la energía de activación.

**Crecimiento de los granos** Movimiento de los bordes de grano mediante la difusión, a fin de reducir el área superficial de bordes de grano. Como resultado, los granos pequeños se encogen y desaparecen, y los restantes se hacen más grandes.

**Difusión** Movimiento de los átomos dentro de un material.

**Difusión en borde de grano** Movimiento de los átomos a lo largo de los bordes de grano. Es más rápida que la difusión volumétrica, ya que los átomos están menos compactos en los bordes de grano.

**Difusión en superficies** Movimiento de los átomos a lo largo de superficies, como grietas o superficie de partículas.

**Difusión intersticial** Movimiento de átomos pequeños, de una posición intersticial a otra, dentro de la estructura cristalina.

**Difusión por vacancias** Movimiento de los átomos cuando un átomo deja una posición normal en la red, para llenar una vacancia en el cristal. Esto crea una vacancia y el proceso continúa.

**Difusión volumétrica** Movimiento de los átomos en el interior de los granos.

**Difusividad** Otro término para el coeficiente de difusión.

**Distancia de difusión** Distancia máxima o deseada que deberán recorrer los átomos; a menudo, distancia existente entre los puntos de concentraciones máxima y mínima del átomo en difusión.

**Efecto Kirkendall** Movimiento físico de una interfase, debido a distintas velocidades de difusión de los átomos dentro del material.

**Energía de activación** Energía requerida para que ocurra una reacción en particular. En la difusión, la energía de activación está relacionada con la energía requerida para mover un átomo de un sitio a otro en la red.

**Flujo** Número de átomos que pasan a través de un plano de área unitaria por unidad de tiempo. Esto se relaciona con la rapidez a la cual se transporta masa por difusión dentro de un sólido.

**Gradiente de concentración** Razón de cambio de la composición en función de la distancia, en un material no uniforme, expresado en átomos/cm<sup>3</sup> · cm o % de átomos/cm.

**Interdifusión** Movimiento de átomos distintos en direcciones opuestas. La interdifusión pudiera finalmente llegar a producir una concentración de equilibrio de átomos dentro del material.

**Metalurgia de polvos** Método para la producción de componentes metálicos; los polvos metálicos se compactan en un molde, mismo que a continuación es calentado para permitir que la difusión y el sinterizado una los polvos, formando una masa sólida.

**Plaga púrpura** Formación de huecos en soldaduras de oro y aluminio debido a las distintas velocidades de difusión de ambos átomos; finalmente puede ocurrir la falla de la soldadura.

**Primera ley de Fick** Ecuación que relaciona el flujo de átomos por difusión con el coeficiente de difusión y con el gradiente de concentración.

**Segunda ley de Fick** Ecuación diferencial parcial que describe la rapidez a la cual se redistribuyen los átomos en un material por difusión.

**Sinterización** Tratamiento a temperatura elevada, que se utiliza para unir partículas pequeñas. La difusión de los átomos hacia los puntos de contacto genera puentes entre partículas. Una difusión adicional finalmente llenará los huecos restantes.

**Soldadura por difusión** Técnica de unión en la cual se juntan a presión dos superficies a temperatura y presión elevadas. La difusión de los átomos en la interfase llena los huecos y produce una fuerte unión.

## PROBLEMAS

**5-1** Se ha encontrado que los átomos se mueven de una posición a otra en la red a una velocidad de  $5 \times 10^5$  saltos por segundo a 400°C, cuando su energía de activación para el movimiento es de 30,000 cal/mol. Calcule la velocidad de saltos a 750°C.

**5-2** El número de vacancias en un material está relacionado con la temperatura mediante una ecuación de Arrhenius. Si a 600°C la fracción de puntos de red que son vacancias es de  $8 \times 10^{-5}$ , determine la fracción de puntos de red a 1000°C.

**5-3** El coeficiente de difusión del Cr en el Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es  $6 \times 10^{-15}$  cm<sup>2</sup>/s a 727°C, y de  $1 \times 10^{-9}$  cm<sup>2</sup>/s a 1400°C. Calcule

- (a) la energía de activación y
- (b) la constante  $D_0$ .

**5-4** El coeficiente de difusión para el O en el Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es de  $4 \times 10^{-15}$  cm<sup>2</sup>/s a 1150°C, y de  $6 \times 10^{-11}$  cm<sup>2</sup>/s a 1715°C. Calcule

- (a) la energía de activación y
- (b) la constante  $D_0$ .

**5-5** Una oblea de silicio de 0.2 mm de espesor es tratada de manera que se produzca un gradiente de concentración uniforme de antimonio. Una de las superficies

contiene 1 átomo de Sb por cada 10<sup>8</sup> átomos de Si y la otra superficie contiene 500 átomos de Sb por cada 10<sup>8</sup> átomos de Si. El parámetro de red del Si aparece en el Apéndice A. Calcule el gradiente de concentración en

- (a) porcentaje atómico de Sb por centímetro, y
- (b) átomos de Sb/cm<sup>3</sup> · cm.

**5-6** Cuando una aleación Cu-Zn solidifica, una parte de la estructura contiene 25 por ciento atómico de zinc y otra porción a 0.025 mm de distancia contiene 20 por ciento atómico de zinc. El parámetro de red para la aleación CCC es aproximadamente  $3.63 \times 10^{-8}$  cm. Determine el gradiente de concentración en

- (a) porcentaje atómico Zn por cm,
- (b) porcentaje en peso Zn por cm, y
- (c) átomos de Zn/cm<sup>3</sup> · cm.

**5-7** Se utiliza una hoja de hierro CC de 0.001 in para separar un gas con alto contenido de hidrógeno de un gas con bajo contenido de hidrógeno a 650°C. De un lado de la hoja están en equilibrio  $5 \times 10^8$  átomos de H/cm<sup>3</sup> y en el otro lado están  $2 \times 10^1$  átomos de H/cm<sup>3</sup>. Determine

- (a) el gradiente de concentración del hidrógeno y

(b) el flujo de hidrógeno a través de la hoja.

**5-8** Una hoja de 1 mm de hierro CCC se utiliza para retener nitrógeno en un intercambiador de calor a 1200°C. La concentración de N en una de las superficies es 0.04% at y la concentración en la segunda superficie es 0.005% at. Determine el flujo de nitrógeno a través de la hoja en átomos de N/cm<sup>2</sup> · s.

**5-9** Un contenedor esférico de 4 cm de diámetro y 0.5 mm de espesor, hecho de hierro CC contiene nitrógeno a 700°C. La concentración en la superficie interna es 0.05% at. de N y en la externa es 0.002% at de N. Calcule el número de gramos de nitrógeno que pierde el contenedor por hora.

**5-10** Debe fabricarse una estructura de hierro CC de manera que a 400°C no permita que se pierdan más de 50 gramos de hidrógeno por año cada centímetro cuadrado de hierro. Si la concentración del hidrógeno en una de las superficies es 0.05 átomos de H por celda unitaria y en la otra superficie es de 0.001 átomos de H por celda unitaria, determine el espesor mínimo del hierro.

**5-11** Determine la temperatura máxima permisible que produzca un flujo de menos de 2000 átomos de H/cm<sup>2</sup> · s a través de una hoja de hierro CC, cuando el gradiente de concentración es de  $-5 \times 10^{18}$  átomos/cm<sup>3</sup> · cm.

**5-12** La conductividad eléctrica del Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es  $8 \times 10^{-18}$  ohm<sup>-1</sup> · cm<sup>-1</sup> a 140°C y de  $1 \times 10^{-7}$  ohm<sup>-1</sup> · cm<sup>-1</sup> a 400°C. Determine la energía de activación que controla la dependencia de la temperatura hacia la conductividad. Explique el proceso mediante el cual la temperatura controla la conductividad.

**5-13** Compare la rapidez de difusión del oxígeno con la del aluminio en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a 1500°C. Explique la diferencia.

**5-14** Compare los coeficientes de difusión del carbono en hierro CC y CCC a la temperatura de transformación alotrópica de 912°C, y explique la diferencia.

**5-15** Compare los coeficientes de difusión para el hidrógeno y el nitrógeno en hierro CCC a 1000°C, y explique la diferencia.

**5-16** Explique por qué un globo de polímero, lleno con helio se desinflará con el transcurso del tiempo.

**5-17** Se realiza un proceso de carburización en un acero con 0.10% de C introduciendo 1.0% C en la superficie a 980°C, temperatura a la cual el hierro es CCC. Calcule el contenido de carbono a 0.01 cm, 0.05 cm y

0.10 cm por debajo de la superficie después de haber transcurrido una hora.

**5-18** El hierro de un contenido de 0.05% de C se calienta hasta 912°C en una atmósfera que produce 1.20% de C en la superficie y así se mantiene durante 24 horas. Calcule el contenido de carbono a 0.05 cm por debajo de la superficie si

(a) el hierro es CC y

(b) el hierro es CCC.

Explique la diferencia.

**5-19** ¿Qué temperatura se requiere para obtener en dos horas una concentración de 0.50% de C a una distancia de 0.5 mm por debajo de la superficie de un acero que tiene 0.20% de C, cuando en la superficie hay 1.10% de C? Suponga que el hierro es CCC.

**5-20** Un acero con 0.15% de C debe carburizarse a 1100°C, alcanzando 0.35% de C a una distancia de 1 mm por debajo de la superficie. Si se mantiene la composición superficial de 0.90% de C, ¿qué tiempo se requerirá?

**5-21** Un acero con 0.02% de C debe carburizarse a 1200°C en un lapso de 4 horas. Se requiere una concentración de 0.45 % de Ca 0.6mm por debajo de la superficie. Calcule el contenido de carbono requerido en la superficie del acero.

**5-22** Un acero para herramienta con 1.2% de C se mantiene expuesto al oxígeno durante 48 horas a 1150°C. El contenido de carbono en la superficie del acero es cero. ¿A qué profundidad se habrá descarburizado el acero a menos de 0.20% de C?

**5-23** Un acero con 0.80% de C debe operar a 950°C en un entorno oxidante, y el contenido de carbono en la superficie del metal es cero. Solamente los 0.02 cm más externos de la pieza de acero pueden quedar por debajo de 0.75% de C. ¿Cuál será la vida máxima de esta pieza en operación?

**5-24** Un acero CC, que contiene 0.001% de N, se endurece por nitruración durante 5 horas a 550°C. Si el contenido de nitrógeno en la superficie del acero es 0.08%, determine el contenido de nitrógeno a 0.25 mm de la superficie.

**5-25** ¿Qué tiempo se requiere para tratar por nitruración a 625°C un acero con 0.002% de N para obtener 0.12% de N a una distancia de 0.002 in por debajo de la superficie? El contenido de nitrógeno en la superficie es 0.15%.

**5-26** Actualmente se puede realizar con éxito un tratamiento térmico de carburización a 1200°C en 1 h. En un esfuerzo para reducir el costo del recubrimiento refractario de horno, se propone reducir la temperatura de carburización a 950°C. ¿Qué tiempo se requerirá para obtener una carburización similar?

**5-27** Durante la solidificación de una aleación Cu-Zn, se encuentra que su composición no es uniforme. Calentando la aleación a 600°C durante 3 horas, la difusión del zinc ayuda a que la composición sea más uniforme. ¿Qué temperatura se requerirá, si se desea realizar este tratamiento de homogeneización en 30 minutos?

**5-28** Un componente cerámico fabricado de MgO se sinteriza con éxito a 1700°C en 90 minutos. A fin de minimizar esfuerzos térmicos durante el proceso, se planea reducir la temperatura hasta 1500°C. ¿Qué limitará la rapidez con la cual se puede efectuar el sinterizado: la difusión de los iones de magnesio o la de los iones de oxígeno? ¿Qué tiempo se requerirá a 1500°C?

**5-29** Una aleación Cu-Zn tiene inicialmente un diámetro de grano de 0.01 mm. La aleación se calienta entonces a diversas temperaturas, permitiendo que ocurra crecimiento de grano. Los tiempos requeridos para que crezcan los granos hasta un diámetro de 0.30 mm son:

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)
500	80,000
600	3,000
700	120
800	10
850	3

Determine la energía de activación para el crecimiento de grano. ¿Tiene esto alguna relación con la difusión del zinc en el cobre? (Sugerencia: Recuerde que la rapidez es el recíproco del tiempo.)

**5-30** Una hoja de oro se une por difusión a una hoja de plata en 1 h a 700°C. A 500°C se requieren 440 h para obtener el mismo grado de unión, y a 300°C la unión requiere 1530 años. ¿Cuál es la energía de activación del proceso de unión por difusión? ¿Qué controla la rapidez del proceso, la difusión del oro o la de

la plata? (Sugerencia: Note que la rapidez es el recíproco del tiempo.)



### Problemas de diseño

**5-31** Diseñe un depósito esférico, con un espesor de pared de 2 cm, que nos asegure que no se perderán más de 50 kg de hidrógeno por año. El depósito, que tiene que operar a 500°C, se puede fabricar de níquel, aluminio, cobre y hierro. A continuación se lista el coeficiente de difusión del hidrógeno y el costo por libra de cada uno de los materiales disponibles:

Material	Datos de difusión		Costo (\$/libra)
	$D_0$ (cm <sup>2</sup> /s)	$Q$ cal/mol	
Níquel	0.0055	8,900	4.10
Aluminio	0.16	10,340	0.60
Cobre	0.011	9,380	1.10
Hierro	(Véase la tabla 5-1)		0.15

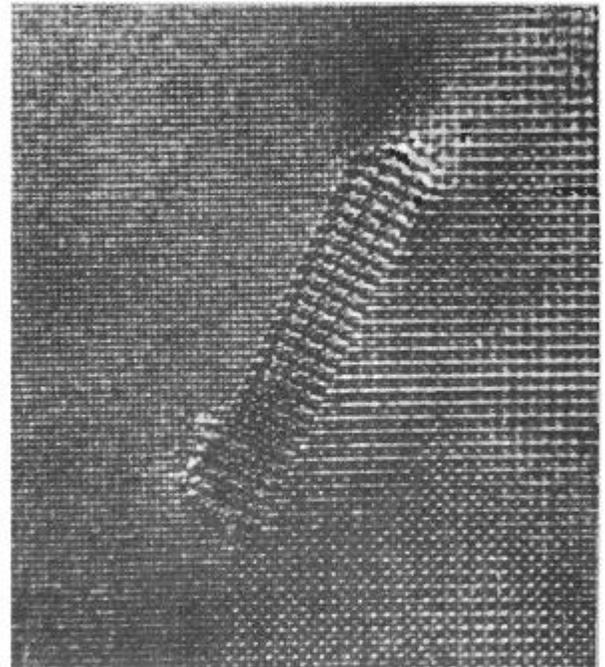
**5-32** Un engrane de acero, que inicialmente contiene 0.10% de C, debe carburizarse de manera que el contenido de carbono, a una profundidad de 0.05 in sea de 0.50% de C. Se puede generar un gas carburizante en la superficie que contenga desde 0.95% de C hasta 1.15% de C. Diseñe un tratamiento térmico de carburización apropiado.

**5-33** Cuando una válvula hecha por fundición que contiene cobre y níquel se solidifica bajo condiciones fuera de equilibrio, se encuentra que la composición de la aleación varía sustancialmente a lo largo de una distancia de 0.005 cm. Por lo general, se puede eliminar esta diferencia de concentración calentando la aleación durante 8 horas a 1200°C; sin embargo, algunas veces este tratamiento hace que la aleación empiece a fundirse, destruyendo la pieza. Diseñe un tratamiento térmico que permita eliminar la heterogeneidad en la concentración sin riesgo de fusión. Suponga que el costo por hora de operación del horno se duplica con cada 100°C de incremento en temperatura.

**E**n estos capítulos se examinarán varios métodos usados para controlar la estructura y las propiedades mecánicas de los materiales. Tres de estos procesos—endurecimiento por tamaño de grano, endurecimiento por solución sólida y endurecimiento por deformación—se basan en introducir y controlar imperfecciones de red, que fueron analizadas en el capítulo 4.

También se obtiene un endurecimiento creando materiales con varias fases, donde cada fase tiene una composición o una estructura cristalina diferente. La interfase entre fases causa el endurecimiento, al interferir con el movimiento de las dislocaciones durante la deformación. El endurecimiento por dispersión, el endurecimiento por envejecimiento y una diversidad de transformaciones de fase, que a menudo se basan en transformaciones alotrópicas, permiten controlar tamaño, forma y distribución de las fases dentro del material. Los procesos de manufactura de los materiales, como el procesamiento por solidificación, el procesamiento por deformación, y el tratamiento térmico, son fundamentales para controlar la microestructura y las propiedades.

Antes de analizar los mecanismos de endurecimiento, se examinarán primero brevemente las pruebas o ensayos mecánicos de los materiales, a fin de comprender sus resultados, que representan las propiedades mecánicas de los materiales.



Se muestra un precipitado de  $\text{Al}_3\text{MgCu}$  en la interfaz de una matriz de aluminio (izquierda superior) y una fase  $\text{Al}_3\text{Li}$  (inferior derecha). Los átomos individuales de cada fase se han hecho visibles mediante la microscopía de resolución atómica. (Cortesía de V. Radmilovic y G. J. Shiflet, Universidad de Virginia.)

# **PARTE II**

## **Control de la microestructura y las propiedades mecánicas de los materiales**

### **CAPÍTULO 6**

Ensayos y propiedades mecánicas

### **CAPÍTULO 7**

Endurecimiento por deformación  
y recocido

### **CAPÍTULO 8**

Principios de endurecimiento  
por solidificación y procesamiento

### **CAPÍTULO 9**

Equilibrio de fases y endurecimiento  
por solución sólida

### **CAPÍTULO 10**

Endurecimiento por dispersión durante  
la solidificación

### **CAPÍTULO 11**

Endurecimiento por dispersión  
mediante transformaciones de fase  
y tratamientos térmico

## Ensayos y propiedades mecánicas

### 6-1 Introducción

Se selecciona un material al adecuar sus propiedades mecánicas a las condiciones de servicio requeridas para el componente. El primer paso en el proceso de selección requiere que se analice la aplicación, a fin de determinar las características más importantes que el material debe poseer. ¿Deberá ser resistente, rígido o dúctil? ¿Estará sometido a la aplicación de una fuerza cíclica importante o a una fuerza súbita intensa; a un gran esfuerzo y temperatura elevada o a condiciones abrasivas? Una vez conocidas las propiedades requeridas, se puede seleccionar el material apropiado, utilizando la información incluida en los manuales. Se debe, sin embargo, conocer cómo se llega a las propiedades incluidas en los manuales, lo que dichas propiedades significan y tomar en cuenta que las propiedades listadas se han obtenido a partir de ensayos y pruebas ideales que pudieran no ser exactamente aplicables a casos o aplicaciones ingenieriles de la vida real.

En este capítulo se estudiarán varios ensayos que se utilizan para medir la forma en que un material resiste una fuerza aplicada. Los resultados de estas pruebas o ensayos serán las propiedades mecánicas de dicho material.

### 6-2 Ensayo de tensión: uso del diagrama esfuerzo-deformación

El **ensayo de tensión** mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada. Un dispositivo de ensayo aparece en la figura 6-1; una probeta típica tiene un diámetro de 0.505 plg y una longitud calibrada de 2 plg. La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una fuerza  $F$ , que se conoce como **carga**. Para medir el alargamiento del material causado por la aplicación de fuerza en la longitud calibrada se utiliza un extensómetro. En la tabla 6-1 se muestra el efecto de la carga en la longitud calibrada de una barra de aleación de aluminio.

**Esfuerzo y deformación ingenieriles** Para un material dado, los resultados de un solo ensayo son aplicables a todo tamaño y formas de muestras, si se convierte la fuerza en esfuerzo y la distancia entre marcas calibradas en deformación. El **esfuerzo** y la **deformación ingenieriles** se definen mediante las ecuaciones siguientes,

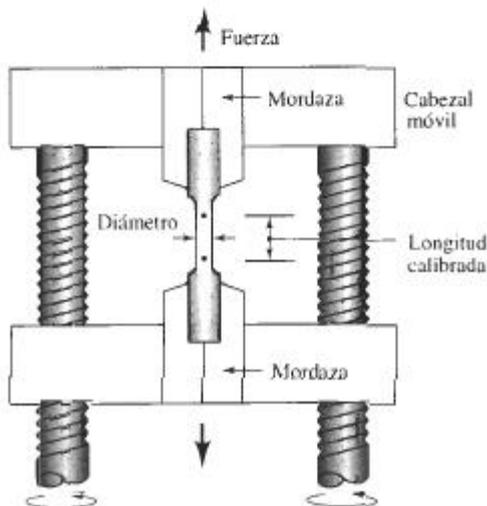
$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \sigma = \frac{F}{A_0} \quad (6-1)$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (6-2)$$

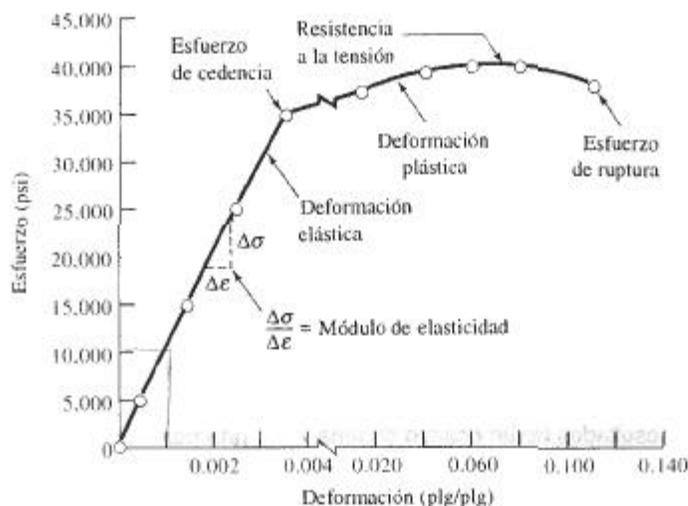
donde  $A_0$  es el área original de la sección transversal de la probeta antes de iniciarse el ensayo,  $l_0$  es la distancia original entre marcas calibradas y  $l$  es la distancia entre las mismas, después de haberse aplicado la fuerza  $F$ . Las conversiones de carga-longitud calibrada a esfuerzo-deformación aparecen en la tabla 6-1. La curva esfuerzo-deformación (figura 6-2) se utiliza para registrar los resultados del ensayo de tensión.

**TABLA 6-1** Resultados de un ensayo de tensión de una barra de aleación de aluminio de 0.505 plg de diámetro

Medido		Calculado	
Carga (lb)	Longitud calibrada (plg)	Esfuerzo (psi)	Deformación (plg/plg)
0	2.000	0	0
1000	2.001	5,000	0.0005
3000	2.003	15,000	0.0015
5000	2.005	25,000	0.0025
7000	2.007	35,000	0.0035
7500	2.030	37,500	0.0150
7900	2.080	39,500	0.0400
8000 (carga máxima)	2.120	40,000	0.0600
7950	2.160	39,700	0.0800
7600 (fractura)	2.205	38,000	0.1025



**FIGURA 6-1** Mediante un cabezal móvil, en la prueba de tensión se aplica una fuerza unidireccional a una probeta.



**FIGURA 6-2** Curva esfuerzo-deformación correspondiente a una aleación de aluminio de la tabla 6-1.

### EJEMPLO 6-1

Convierta los datos de carga-longitud calibrada que aparecen en la tabla 6-1 a esfuerzo deformación ingenieriles y grafique la curva esfuerzo-deformación.

### SOLUCIÓN

En el caso de una carga de 1000 lb:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{1000 \text{ lb}}{(\pi/4)(0.505 \text{ plg})^2} = \frac{1000 \text{ lb}}{0.2 \text{ plg}^2} = 5000 \text{ psi}$$

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{2.001 \text{ plg} - 2.000 \text{ plg}}{2.000 \text{ plg}} = 0.0005 \text{ plg/plg}$$

Los resultados de cálculos similares para cada una de las cargas restantes se dan en la tabla 6-1 y aparecen en la figura 6-2. ■

**Unidades** Se utilizan muchas unidades distintas para reportar los resultados de un ensayo de tensión. Las unidades más comunes para el esfuerzo son lb por plg<sup>2</sup> (psi) y el megapascal (MPa). Las unidades de la deformación pueden ser plg/plg, cm/cm y m/m. Los factores de conversión para el esfuerzo se resumen en la tabla 6-2. Dado que la deformación es adimensional, no se requieren factores de conversión para cambiar de sistema de unidades.

**TABLA 6-2** Unidades y factores de conversión

1 libra (lb) = 4.448 newtons (N)
1 psi = lb por pulgada cuadrada
1 MPa = megapascal = meganewton por metro cuadrado (MN/m <sup>2</sup> ) = newton por milímetro cuadrado (N/mm <sup>2</sup> )
1 GPa = 1000 MPa = gigapascal
1 ksi = 1000 psi = 6.895 MPa
1 psi = 0.006895 MPa
1 MPa = 0.145 ksi = 145 psi

**EJEMPLO 6-2****Diseño de una varilla de suspensión**

Una varilla de suspensión debe resistir una fuerza aplicada de 45,000 lb. Para garantizar un factor de seguridad suficiente, el esfuerzo máximo permisible sobre la varilla se limita a 25,000 psi. La varilla debe tener por lo menos 150 plg de largo, pero no debe deformarse elásticamente más de 0.25 plg al aplicar la fuerza. Diseñe la varilla apropiada.

**SOLUCIÓN**

Se puede utilizar la definición de esfuerzo ingenieril para calcular el área de la sección recta de la varilla que se requiere:

$$A_0 = \frac{F}{\sigma} = \frac{45,000}{25,000} = 1.8 \text{ plg}^2$$

La varilla se puede producir de diversas formas, siempre y cuando su sección transversal sea de 1.8 plg<sup>2</sup>. Para una sección transversal circular, el diámetro mínimo para asegurar que el esfuerzo no sea demasiado grande es:

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} = 1.8 \text{ plg}^2 \quad \text{o} \quad d = 1.51 \text{ plg}$$

La máxima deformación elástica permisible es de 0.25 plg. De la definición de deformación ingenieril se tiene:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25}{l_0}$$

De la figura 6-2 la deformación esperada para un esfuerzo de 25,000 psi es de 0.0025 plg/plg. Si se utiliza el área de la sección transversal anteriormente determinada, la longitud máxima de la varilla será

$$0.0025 = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25}{l_0} \quad \text{o} \quad l_0 = 100 \text{ plg}$$

Sin embargo, se ha fijado la longitud mínima de la varilla como 150 plg. Para producir una varilla más larga, se debe hacer mayor el área de la sección transversal de la misma. La deformación mínima permitida para la varilla de 150 plg es

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{0.25}{150} = 0.001667 \text{ plg/plg}$$

El esfuerzo, de la figura 6-2, es de aproximadamente 16,670 psi, lo cual es menor al máximo de 25,000 psi. La superficie del área transversal mínima es, por tanto,

$$A_0 = \frac{F}{\sigma} = \frac{45,000}{16,670} = 2.70 \text{ plg}^2$$

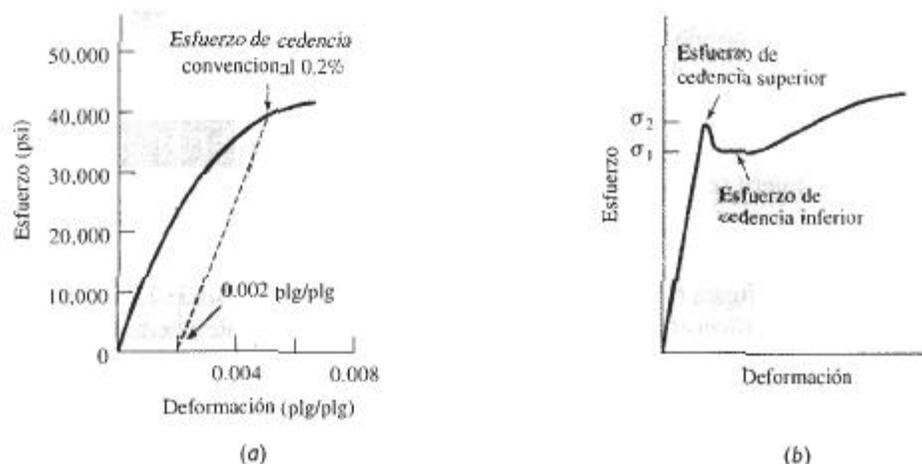
A fin de satisfacer tanto los requisitos de esfuerzo máximo como de elongación mínima, la varilla deberá tener por lo menos 2.7 plg<sup>2</sup> de sección transversal, es decir, un diámetro de 1.85 plg.

**6-3 Propiedades obtenidas del ensayo de tensión**

A partir de un ensayo de tensión se puede obtener información relacionada con la resistencia, rigidez y ductilidad de un material.

**Esfuerzo de cedencia** El **esfuerzo de cedencia\*** es el esfuerzo al cual la deformación plástica se hace importante. En los metales, es por lo general el *esfuerzo requerido para que las dislocaciones se deslicen*. El esfuerzo de cedencia es, por tanto, el esfuerzo que divide los comportamientos elástico y plástico del material. Si se desea diseñar un componente que no se deforme plásticamente, se debe seleccionar un material con un límite elástico elevado, o fabricar el componente de tamaño suficiente para que la fuerza aplicada produzca un esfuerzo que quede por debajo del esfuerzo de cedencia.

En algunos materiales, el esfuerzo al cual el material cambia su comportamiento de *elástico a plástico no se detecta fácilmente*. En este caso, se determina un **esfuerzo de cedencia convencional** [figura 6-3(a)]. Se traza una línea paralela a la porción inicial de la curva esfuerzo-deformación, pero desplazada a 0.002 plg/plg (0.2%) del origen. El esfuerzo de cedencia convencional de 0.2% es el esfuerzo al cual dicha línea interseca la curva esfuerzo-deformación. En la figura 6-3(a), el límite elástico convencional de 0.2% para el hierro fundido gris es de 40,000 psi.



**FIGURA 6-3** (a) Determinación del límite elástico convencional al 0.2% de deformación en el hierro fundido gris y (b) esfuerzo de cedencia superior e inferior que describe el comportamiento mecánico de un acero al bajo carbono.

La curva esfuerzo deformación para ciertos aceros de bajo carbono presentan un esfuerzo de cedencia o límite elástico doble [figura 6-3(b)]. Se espera que el material se deforme plásticamente al esfuerzo  $\sigma_1$ . Sin embargo, los pequeños átomos intersticiales de carbono agrupados alrededor de las dislocaciones interfieren con el deslizamiento, elevando el punto de fluencia o límite de elasticidad hasta  $\sigma_2$ . Sólo después de haber aplicado un esfuerzo mayor  $\sigma_2$ , empiezan a deslizarse las dislocaciones. Después de que se inicia el deslizamiento en  $\sigma_2$ , las dislocaciones se alejan de los agrupamientos de átomos de carbono y continúan moviéndose muy aprisa bajo el esfuerzo  $\sigma_1$  menor.

**Resistencia a la tensión** El esfuerzo obtenido de la fuerza más alta aplicada es la **resistencia a la tensión**, que es el esfuerzo máximo sobre la curva esfuerzo-deformación ingenieril. En muchos materiales dúctiles, la deformación no se mantiene uniforme. En cierto momento, una región se deforma más que otras y ocurre una reducción local de importancia en la sección recta (figura 6-4). Esta región localmente deformada se conoce como **zona de estricción\*\***. Da-

\* También se le conoce como límite elástico.

\*\* También se le conoce como encuellamiento.

do que el área de la sección transversal en este punto se hace más pequeña, se requiere una fuerza menor para continuar su deformación, y se reduce el esfuerzo ingenieril, calculado a partir del área original  $A_0$ . La resistencia a la tensión es el esfuerzo al cual se inicia este encuellamiento o estricción en materiales dúctiles.



**FIGURA 6-4** Deformación localizada durante el ensayo de tensión de un material dúctil produciendo una región de encuellamiento.

**Propiedades elásticas** El **módulo de elasticidad** o *módulo de Young*,  $E$ , es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en su región elástica. Esta relación es la **ley de Hooke**:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6-3)$$

Este módulo está íntimamente relacionado con la energía de enlace de los átomos (figura 2-14). Una pendiente muy acentuada o abrupta en la gráfica fuerza-distancia en la zona de equilibrio indica que se requieren de grandes fuerzas para separar los átomos y hacer que el material se deforme elásticamente. Por tanto, el material tiene un módulo de elasticidad alto. Las fuerzas de enlace y el módulo de elasticidad, por lo general son mayores en materiales de punto de fusión alto (tabla 6-3).

El módulo es una medida de la **rigidez** del material. Un material rígido, con un alto módulo de elasticidad, conserva su tamaño y su forma incluso al ser sometido a una carga en la región elástica. La figura 6-5 compara el comportamiento elástico del acero y del aluminio. Si a un eje de acero se le aplica un esfuerzo de 30,000 psi se deforma elásticamente 0.001 plg/plg; con el mismo esfuerzo, un eje de aluminio se deforma 0.003 plg/plg. El hierro tiene un módulo de elasticidad tres veces mayor que el del aluminio.

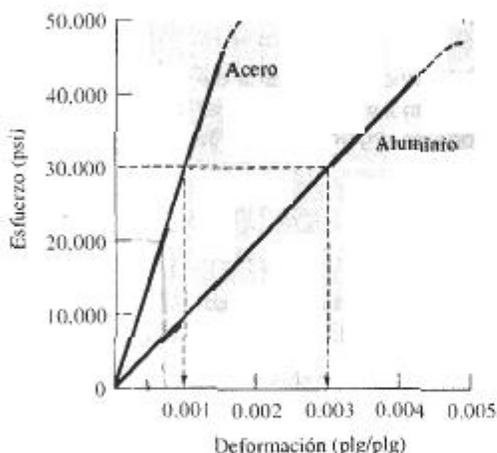
El **módulo de resistencia** ( $E_r$ ), que es el área que aparece bajo la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación, es la energía elástica que un material absorbe o libera durante la aplicación y liberación de la carga aplicada respectivamente. En el caso de un comportamiento elástico lineal:

$$E_r = \left(\frac{1}{2}\right)(\text{esfuerzo de cedencia})(\text{deformación a la cedencia}). \quad (6-4)$$

La capacidad de un resorte o de una pelota de golf para realizar satisfactoriamente su cometido, depende de un módulo de resiliencia alto.

**TABLA 6-3** Propiedades elásticas y temperaturas de fusión ( $T_m$ ) de materiales seleccionados

Material	$T_m$ (°C)	$E$		$\mu$
		(psi)	(GPa)	
Pb	327	$2.0 \times 10^6$	(13.8)	0.45
Mg	650	$6.5 \times 10^6$	(44.8)	0.29
Al	660	$10.0 \times 10^6$	(69.0)	0.33
Cu	1085	$18.1 \times 10^6$	(124.8)	0.36
Fe	1538	$30.0 \times 10^6$	(206.9)	0.27
W	3410	$59.2 \times 10^6$	(408.3)	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2020	$55.0 \times 10^6$	(379.3)	0.26
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		$44.0 \times 10^6$	(303.4)	0.24

**FIGURA 6-5** Comparación del comportamiento elástico del acero y del aluminio.

La **relación de Poisson**,  $\mu$  relaciona la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo simple a tensión o compresión, con la deformación lateral que ocurre simultáneamente:

$$\mu = \frac{-\varepsilon_{\text{lateral}}}{\varepsilon_{\text{longitudinal}}} \quad (6-5)$$

En general, la relación de Poisson es de aproximadamente 0.3 (tabla 6-3).

### EJEMPLO 6-3

De los datos del ejemplo 6-1, calcule el módulo de elasticidad de la aleación de aluminio. Utilice este módulo para determinar la longitud de una barra de 50 plg a la cual se le ha aplicado un esfuerzo de 30,000 psi.

### SOLUCIÓN

Cuando se aplica un esfuerzo de 35,000 psi, se produce una deformación de 0.0035 plg/plg. Por tanto:

$$\text{Módulo de elasticidad} = E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{35,000}{0.0035} = 10 \times 10^6 \text{ psi}$$

De la ley de Hooke:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{30,000}{10 \times 10^6} = 0.003 \text{ plg/plg} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

$$l = l_0 + \epsilon l_0 = 50 + (0.003)(50) = 50.15 \text{ plg}$$

**Ductilidad** La **ductilidad** mide el grado de deformación que puede soportar un material sin romperse. Se puede medir la distancia entre las marcas calibradas en una probeta antes y después del ensayo. El **% de elongación** representa la distancia que la probeta se alarga plásticamente antes de la fractura:

$$\% \text{ de elongación} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100, \quad (6-6)$$

donde  $l_f$  es la distancia entre las marcas calibradas después de la ruptura del material.

Un segundo método para medir la ductilidad es calcular el cambio porcentual en el área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después del ensayo. El **% de reducción en área** expresa el adelgazamiento sufrido por el material durante la prueba:

$$\% \text{ de reducción en área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100, \quad (6-7)$$

donde  $A_f$  es el área de la sección transversal en la superficie de la fractura.

La ductilidad es importante tanto para los diseñadores como para los fabricantes. El diseñador de un componente preferirá un material que tenga por lo menos cierta ductilidad, de manera que si el esfuerzo aplicado resulta demasiado alto, el componente se deforme antes de romperse. Los fabricantes también prefieren un material dúctil, a fin de manufacturar formas complicadas sin que se rompa durante el proceso.

#### EJEMPLO 6-4

La aleación de aluminio del ejemplo 6-1 tiene una longitud final entre marcas calibradas, después de haber fallado, de 2.195 plg y un diámetro final de 0.398 plg en la fractura. Calcule la ductilidad de esta aleación.

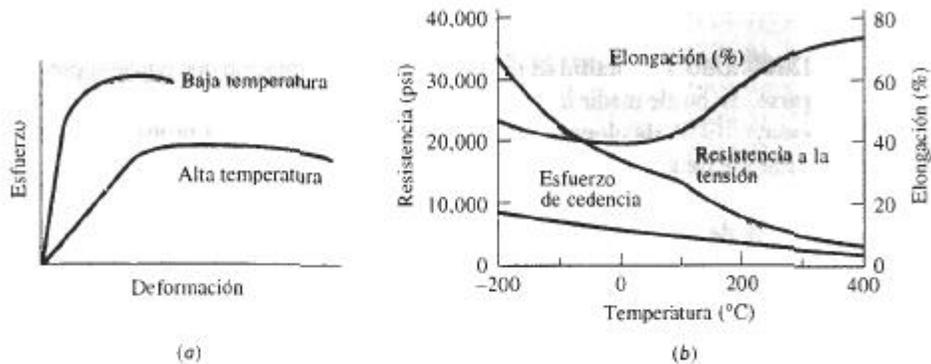
#### SOLUCIÓN

$$\text{Elongación (\%)} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \frac{2.195 - 2.000}{2.000} \times 100 = 9.75\%$$

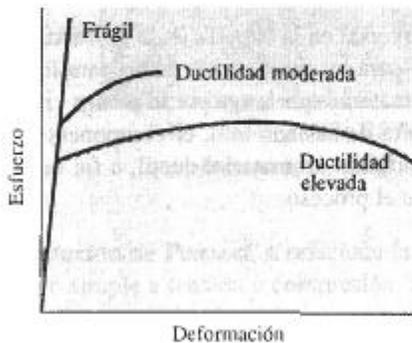
$$\begin{aligned} \text{Reducción en superficie (\%)} &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \\ &= \frac{(\pi/4)(0.505)^2 - (\pi/4)(0.398)^2}{(\pi/4)(0.505)^2} \times 100 \\ &= 37.9\% \end{aligned}$$

La longitud final calibrada es menor de 2.205 plg (tabla 6-1) debido a que después de la fractura, el esfuerzo elástico se ha recuperado.

**Efecto de la temperatura** Las propiedades a la tensión dependen de la temperatura (figura 6-6). El esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad disminuyen a temperaturas más altas, en tanto que, por lo general, la ductilidad se incrementa. Un fabricante quizá desee deformar un material a una alta temperatura (lo que se llama comúnmente *trabajo en caliente*) para aprovechar esa mayor ductilidad y los menores esfuerzos requeridos.



**FIGURA 6-6** Efecto de la temperatura (a) en la curva esfuerzo deformación y (b) sobre las propiedades a tensión de una aleación de aluminio.



**FIGURA 6-7** Comportamiento mecánico en el ensayo de tensión de materiales frágiles, en comparación con materiales más dúctiles.

## 6-4 El ensayo de flexión para materiales frágiles

En los materiales dúctiles, la curva esfuerzo-deformación ingenieril generalmente pasa por un valor máximo; este esfuerzo máximo es la resistencia del material a la tensión. La falla ocurre a un esfuerzo menor después de que el encuellamiento ha reducido el área de la sección transversal que soporta la carga. En materiales con poca ductilidad la falla ocurre a la carga máxima, donde la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura son las mismas. En materiales muy frágiles, incluyendo muchos cerámicos, el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión y el punto de ruptura tienen un mismo valor (figura 6-7).

En muchos materiales frágiles no se puede efectuar con facilidad el ensayo de tensión debido a la presencia de defectos de superficie. A menudo, con sólo colocar un material frágil en

las mordazas de la máquina de tensión éste se rompe. Estos materiales se pueden probar utilizando el **ensayo de flexión** (figura 6-8). Al aplicar la carga en tres puntos causando flexión, actúa una fuerza que provoca tensión sobre la superficie, opuesta al punto medio de la probeta. La fractura iniciará en este sitio. La **resistencia a la flexión**, o **módulo de ruptura** describe la resistencia del material:

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3FL}{2wh^2}, \quad (6-8)$$

donde  $F$  es la carga a la fractura,  $L$  la distancia entre los dos puntos de apoyo,  $w$  es el ancho de la probeta, y  $h$  es su altura.

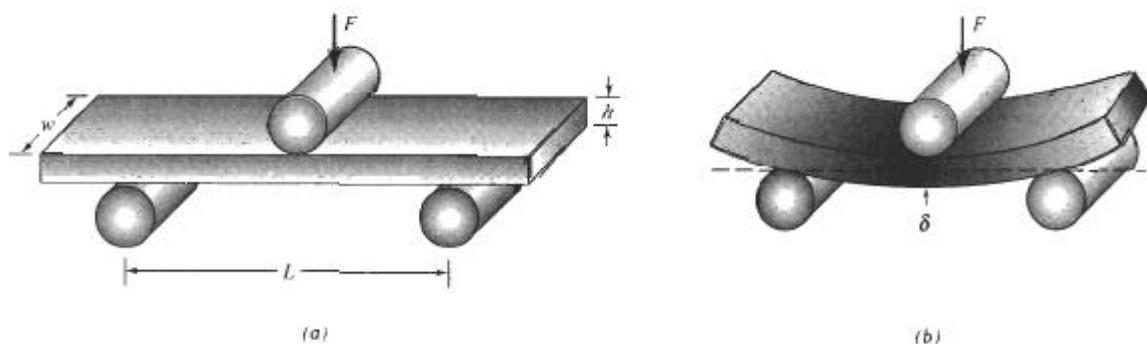
Los resultados de la prueba de flexión son similares a las curvas esfuerzo-deformación; sin embargo, el esfuerzo se traza en función de deflexiones, en vez de en función de deformaciones (figura 6-9).

El módulo de elasticidad a la flexión o **módulo en flexión** se calcula en la región elástica de la figura 6-9:

$$\text{Módulo en flexión} = \frac{E^3F}{4wh^3\delta} \quad (6-9)$$

donde  $\delta$  es la deflexión de la viga al aplicarse una fuerza  $F$ .

Debido a que durante la compresión las fisuras y los defectos tienden a mantenerse cerrados, frecuentemente los materiales frágiles se diseñan de forma que sobre el componente sólo actúen esfuerzos de compresión. A menudo, se tiene que los materiales frágiles fallan a esfuerzos de compresión mucho más altos que los de tensión (tabla 6-4).



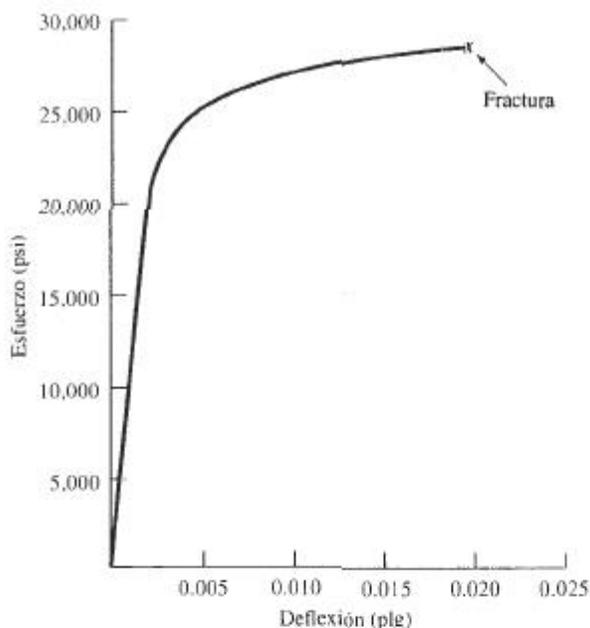
**FIGURA 6-8** (a) Ensayo de flexión utilizado para medir la resistencia de materiales frágiles, y (b) deflexión  $\delta$  obtenida durante la flexión de la probeta.

### EJEMPLO 6-5

La resistencia a la flexión de un material compuesto reforzado con fibras de vidrio es de 45,000 psi y el módulo en flexión es de  $18 \times 10^6$  psi. Una muestra, que tiene 0.5 plg de ancho, 0.375 plg de alto y 8 plg de largo, está apoyada sobre dos varillas separadas 5 plg. Determine la fuerza requerida para fracturar el material, y la deflexión de dicha muestra al momento de la fractura, suponiendo que no ocurre deformación plástica.

### SOLUCIÓN

Con base en la descripción de la muestra,  $w = 0.5$  plg,  $h = 0.375$  plg y  $L = 5$  plg. De la ecuación 6-8:



**FIGURA 6-9** Curva esfuerzo de flexión para el MgO, obtenida a partir de un ensayo de flexión.

**TABLA 6-4** Comparación de la resistencia a la tensión, a la compresión y a la flexión de materiales cerámicos y compuestos seleccionados

Material	Resistencia a la tensión (psi)	Resistencia a la compresión (psi)	Resistencia a la flexión (psi)
Poliéster—50% de fibras de vidrio	23,000	32,000	45,000
Poliéster—50% de tejido de fibra de vidrio	37,000	27,000*	46,000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99% puro)	30,000	375,000	50,000
SiC (sinterizado sin presión)	25,000	560,000	80,000

\* Un cierto número de materiales compuestos son bastante deficientes a compresión.

$$45,000 = \frac{3FL}{2wh^2} = \frac{(3)(F)(5)}{(2)(0.5)(0.375)^2} = 106.7F$$

$$F = \frac{45,000}{106.7} = 422 \text{ lb}$$

Por tanto, la deflexión según la ecuación 6-9 es

$$18 \times 10^6 = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} = \frac{(5)^3 (422)}{(4)(0.5)(0.375)^3 \delta}$$

$$\delta = 0.0278 \text{ plg}$$

## 6-5 Esfuerzo real-deformación real

La reducción en el esfuerzo, más allá de la resistencia a la tensión ocurre en razón a nuestra definición de esfuerzo ingenieril. Se utilizó el área original  $A_0$  en los cálculos, pero esto no es correcto, porque dicha área se modifica continuamente. Se definen **esfuerzo real** y **deformación real** mediante las ecuaciones siguientes:

$$\text{Esfuerzo real} = \sigma_r = \frac{F}{A} \quad (6-10)$$

$$\text{Deformación real} = \int \frac{dl}{l} = \text{Plg} \left( \frac{l}{l_0} \right) = \text{Plg} \left( \frac{A_0}{A} \right), \quad (6-11)$$

donde  $A$  es el área real a la cual se le aplica la fuerza  $F$ . La expresión  $\ln(A_0/A)$  deberá ser utilizada después de que empiece el encuellamiento. La curva esfuerzo real-deformación real se compara con la curva esfuerzo-deformación ingenieril en la figura 6-10. El esfuerzo real sigue incrementándose después del encuellamiento, ya que aunque la carga requerida se reduce, el área se reduce aún más.

El comportamiento mecánico real en el ensayo de tensión se utiliza para el diseño de los procesos de manufactura en los que el material se deforma plásticamente. Cuando se excede el esfuerzo de cedencia, el material se deforma. El componente ha fallado, porque ya no tiene la forma original. Además, sólo después de que se inicia el encuellamiento se desarrolla una diferencia significativa entre ambas curvas. En este punto, el componente está ya muy deformado y no satisface las condiciones de uso requerido.



**FIGURA 6-10** Relación entre el diagrama de esfuerzo real-deformación real y el diagrama esfuerzo-deformación ingenieril.

### EJEMPLO 6-6

Compare el esfuerzo y la deformación ingenieriles con el esfuerzo y la deformación reales, para la aleación de aluminio del ejemplo 6-1 en (a) la carga máxima y (b) a la fractura. El diámetro a carga máxima es de 0.497 plg y a la fractura es de 0.398 plg.

### SOLUCIÓN

a. A la carga máxima o resistencia a la tensión:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \frac{F}{A_0} = \frac{8000}{(\pi/4)(0.505)^2} = 40,000 \text{ psi}$$

$$\text{Esfuerzo real} = \frac{F}{A} = \frac{8000}{(\pi/4)(0.497)^2} = 41,237 \text{ psi}$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{2.120 - 2.000}{2.000} = 0.060 \text{ plg/plg}$$

$$\text{Deformación real} = \text{Plg} \left( \frac{l}{l_0} \right) = \text{Plg} \left( \frac{2.120}{2.000} \right) = 0.058 \text{ plg/plg}$$

b. A la fractura:

$$\text{Esfuerzo ingenieril} = \frac{F}{A_0} = \frac{7600}{(\pi/4)(0.505)^2} = 38,000 \text{ psi}$$

$$\text{Esfuerzo real} = \frac{F}{A} = \frac{7600}{(\pi/4)(0.398)^2} = 61,090 \text{ psi}$$

$$\text{Deformación ingenieril} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{2.205 - 2.000}{2.000} = 0.1025 \text{ plg/plg}$$

$$\begin{aligned} \text{Deformación real} &= \text{Plg} \left( \frac{A_0}{A_f} \right) = \text{Plg} \left[ \frac{(\pi/4)(0.505)^2}{(\pi/4)(0.398)^2} \right] \\ &= \text{Plg}(1.610) \approx 0.476 \text{ plg/plg} \end{aligned}$$

El esfuerzo real se hace mucho mayor que el esfuerzo ingenieril, sólo después de que se inicia el encuellamiento.

## 6-6 El ensayo de dureza: su naturaleza y uso

El **ensayo de dureza** mide la resistencia de la superficie de un material a la penetración por un objeto duro. Se han inventado una diversidad de pruebas de dureza, pero las de uso más común son los ensayos Rockwell y Brinell (figura 6-11).

En el *ensayo de dureza Brinell*, una esfera de acero duro (por lo general de 10 mm de diámetro), se oprime sobre la superficie del material. Se mide el diámetro de la impresión generada, comúnmente de 2 a 6 mm, y se calcula el número de dureza o índice de dureza Brinell (abreviado como HB o BHN) a partir de la ecuación siguiente:

$$HB = \frac{F}{(\pi/2)D(D - \sqrt{D^2 - D_i^2})}, \quad (6-12)$$

donde  $F$  es la carga aplicada en kilogramos,  $D$  es el diámetro del penetrador en mm, y  $D_i$  es el diámetro de la impresión en mm.

El *ensayo de dureza Rockwell* utiliza una pequeña bola de acero para materiales blandos y un cono de diamante para materiales más duros. La profundidad de la penetración es medida automáticamente por el instrumento y se convierte a índice de dureza Rockwell (HR). Se utilizan diversas variantes del ensayo Rockwell, incluyendo las descritas en la tabla 6-5. La escala Rockwell C (HRC) se utiliza para aceros duros, en tanto que para medir la dureza del aluminio se selecciona la escala Rockwell F (HRF).

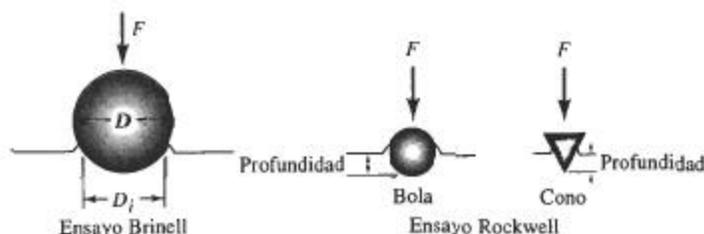


FIGURA 6-11 Ensayos de dureza Brinell y Rockwell.

TABLA 6-5 Comparación de ensayos de dureza típicos

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro y acero fundidos
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono de diamante	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono de diamante	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono de diamante	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

Los ensayos Vickers (HV) y Knoop (HK) son pruebas de *microdureza*; producen penetraciones tan pequeñas que se requiere de un microscopio para obtener su medición.

Los índices de dureza se utilizan principalmente como base de comparación de materiales; de sus especificaciones para la manufactura y tratamiento térmico, para el control de calidad y para efectuar correlaciones con otras propiedades de los mismos. Por ejemplo, la dureza Brinell está relacionada estrechamente con la resistencia a la tensión del acero mediante la relación siguiente

$$\text{Resistencia a la tensión (psi)} = 500 HB \quad (6-13)$$

Se puede obtener un índice de dureza Brinell en unos cuantos minutos sin preparar ni destruir el componente; y obteniendo una buena aproximación de su resistencia a la tensión.

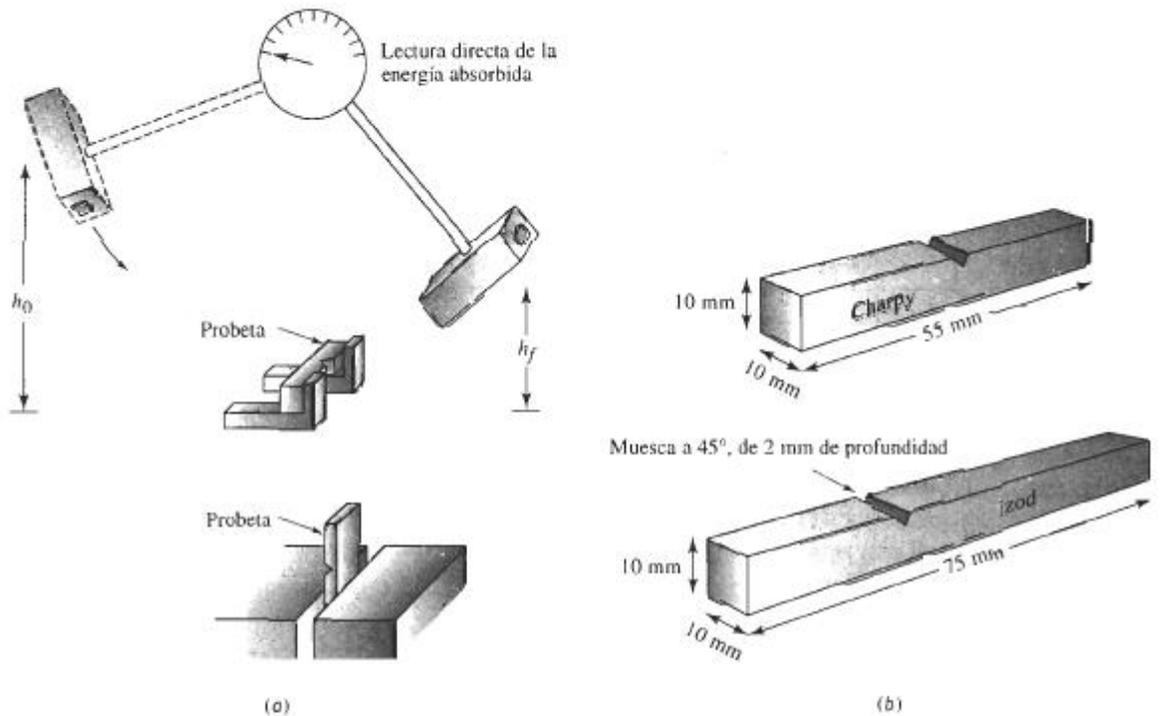
La dureza se relaciona con la resistencia al desgaste. Un material que se utiliza para fragmentar o para moler mineral debe ser muy duro para asegurarse de que no se desgastará o sufrirá abrasión debido a los duros materiales que maneja. De una manera similar, los dientes de los engranes en la transmisión o en el sistema impulsor de un vehículo deberán ser lo suficientemente duros para que no se desgasten. Generalmente se encuentra que los materiales poliméricos son excepcionalmente blandos, los metales son de una dureza intermedia y los cerámicos son excepcionalmente duros.

## 6-7 Ensayo de impacto

Cuando se somete un material a un golpe súbito e intenso, en el cual la velocidad de aplicación del esfuerzo es extremadamente grande, el material puede tener un comportamiento más frágil comparado con el que se observa en el ensayo de tensión. El **ensayo de impacto** a menudo se utiliza para evaluar la fragilidad de un material bajo estas condiciones. Se han diseñado muchos procedimientos, incluyendo el ensayo *Charpy* y el ensayo *Izod* (figura 6-12). Este último generalmente se utiliza para materiales no metálicos. La probeta puede o no tener muesca; la que tiene muesca en V mide mejor la resistencia del material a la propagación de grietas.

Durante el ensayo, un péndulo pesado, que inicia su movimiento desde una altura  $h_i$ , describe un arco y posteriormente golpea y rompe la probeta; llega a una altura final  $h_f$  menor. Si se conocen las alturas inicial y final del péndulo, se puede calcular la diferencia en su energía

potencial. Esta diferencia es la **energía de impacto** absorbida durante la falla o ruptura de la probeta. En el caso del ensayo Charpy, la energía por lo general se expresa en libra-pie (lb · pie) o en joules (J) donde  $1 \text{ lb} \cdot \text{pie} = 1.356 \text{ J}$ . Los resultados del ensayo Izod se expresan en lb · pie/plg o  $\text{J/m}$ . La capacidad de un material para resistir cargas de impacto, a menudo se conoce como **tenacidad** del material.



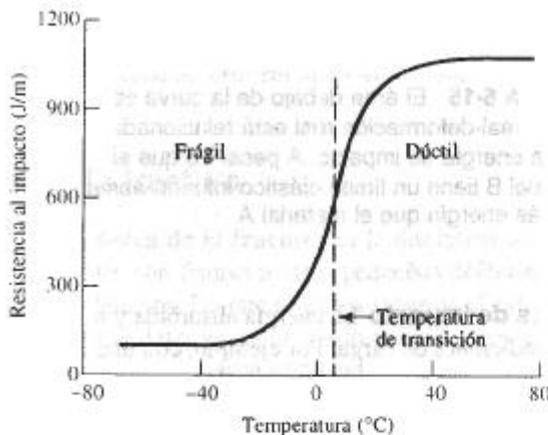
**FIGURA 6-12** El ensayo de impacto: (a) Los ensayos Charpy e Izod, y (b) dimensiones de las probetas típicas.

## 6-8 Propiedades obtenidas a partir del ensayo de impacto

Los resultados de una serie de pruebas de impacto efectuadas a un polímero a diferentes temperaturas aparecen en la figura 6-13.

**Temperatura de transición** La **temperatura de transición** es la temperatura a la cual un material cambia de un comportamiento dúctil a un comportamiento frágil. Esta temperatura puede definirse como la energía promedio entre las regiones dúctil y frágil, a una energía absorbida específica, o al tener ciertas características en la fractura. Un material sujeto a cargas de impacto durante las condiciones de servicio deberá tener una temperatura de transición por *debajo* de la temperatura de operación determinada por el ambiente que rodea al material.

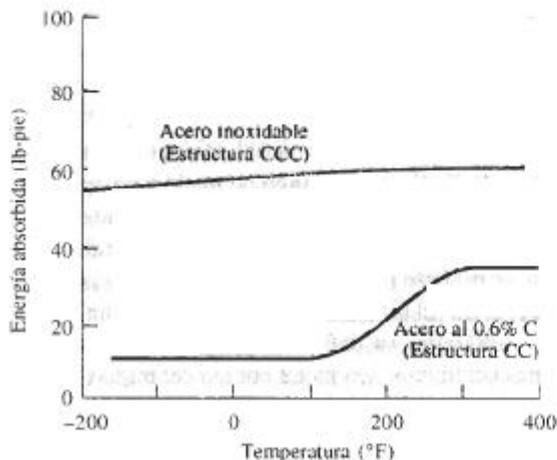
No todos los materiales tienen una temperatura de transición bien definida (figura 6-14). Los metales CC tienen temperatura de transición, pero la mayoría de los CCC no la tienen. Los metales CCC absorben valores altos de energía durante las pruebas de impacto; esta energía disminuye gradualmente e incluso a veces se incrementa conforme se reduce la temperatura.



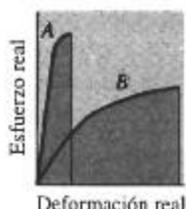
**FIGURA 6-13** Resultado de una serie de ensayos de impacto Izod para un polímero termoplástico de nylon super tenaz.

**Sensibilidad a las muescas** Las muescas causadas por un maquinado, fabricación o diseño defectuoso son concentradoras de esfuerzos y reducen la tenacidad de los materiales. La **sensibilidad a las muescas** de un material puede evaluarse comparando las energías absorbidas por probetas con y sin muescas. Las energías absorbidas son mucho menores en probetas con muesca si dicho material es sensible a éstas.

**Relación con el diagrama esfuerzo-deformación** La energía necesaria para romper un material está relacionada con el área bajo la curva esfuerzo real-deformación real (figura 6-15). Aquellos metales con resistencia y ductilidad altas tienen buena tenacidad. Los materiales cerámicos y muchos compuestos, por otra parte, poseen poca tenacidad, a pesar de su alta resistencia, ya que virtualmente no tienen ductilidad.



**FIGURA 6-14** Resultados de pruebas Charpy con muesca en V para un acero al carbono CC y para un acero inoxidable CCC. La estructura cristalina CCC generalmente absorbe más energía y no tiene temperatura de transición dúctil-frágil.



**FIGURA 6-15** El área debajo de la curva esfuerzo real-deformación real está relacionada con la energía de impacto. A pesar de que el material B tiene un límite elástico inferior, absorbe más energía que el material A.

**Uso de las propiedades de impacto** La energía absorbida y la temperatura de transición son muy sensibles a las condiciones de carga. Por ejemplo, con una elevada rapidez en la aplicación de la energía a la muestra se reduce la energía absorbida y se incrementa la temperatura de transición. El tamaño de las muestras también afecta los resultados; debido a que es más difícil que se deforme un material con mayor espesor, se requiere de energías más pequeñas para romperlos. Finalmente, la configuración de las muescas afecta el comportamiento; una grieta en la superficie permite la absorción de menos energía que una muesca en V en el material. Como a menudo no es posible predecir o controlar todas estas condiciones, el ensayo de impacto se utiliza más para comparación y selección de materiales.

#### **EJEMPLO 6-7** Diseño de un mazo

Diseñe un mazo de 8 lb para clavar en el piso postes de acero de una cerca.

#### **SOLUCIÓN**

Primero se deberán considerar los requisitos de diseño que debe cumplir el mazo. Una lista parcial incluiría:

1. El mango deberá ser ligero, pero al mismo tiempo lo suficientemente fuerte para que no se rompa de manera catastrófica.
2. La cabeza del mazo no debe romperse o desportillarse durante el uso, incluso a temperaturas bajo cero.
3. La cabeza no deberá deformarse por un uso continuo.
4. La cabeza debe ser lo suficientemente grande para asegurarse que el usuario no falle el golpe al poste, y no deberá tener muescas agudas que pudieran causar esquirlas.
5. El mazo deberá ser económico.

Aunque el mango se puede fabricar de un material compuesto ligero y resistente (como un polímero reforzado con fibras de Kevlar), un mango de madera de aproximadamente 30 plg de largo es mucho más económico y proporciona la tenacidad suficiente. Como se mostrará en un capítulo posterior, la madera se clasifica como un compuesto natural reforzado por fibras.

Para producir la cabeza, se prefiere un material que tenga una temperatura de transición baja, que pueda absorber una energía relativamente alta durante el impacto, y que al mismo tiempo tenga suficiente dureza para evitar su deformación. El requisito de tenacidad excluiría la mayor parte de los materiales cerámicos. Un metal cúbico centrado en las caras, como el acero inoxidable CCC o el cobre, proporciona una tenacidad superior incluso a temperaturas bajas; sin embargo, estos metales son relativamente blandos y costosos. Una selección apropiada es un acero normal CC. Los aceros ordinarios son baratos, tienen una buena dureza y resistencia, y tienen suficiente tenacidad a bajas temperaturas.

En el Apéndice A, encontrará que la densidad del hierro es  $7.87 \text{ g/cm}^3$  o  $0.28 \text{ lb/plg}^3$ . El volumen de acero requerido es  $V = (8 \text{ lb}) / (0.28 \text{ lb/plg}^3) = 28.6 \text{ plg}^3$ . A fin de asegurarse de no per-

der el objetivo, la cabeza puede tener forma cilíndrica, con un diámetro de 2.5 plg. La longitud de la cabeza sería entonces de 5.8 plg. ■

## 6-9 Tenacidad a la fractura

La **mecánica de la fractura** es la disciplina que se enfoca al estudio del comportamiento de materiales con fisuras u otros pequeños defectos. Es cierto que todos los materiales tienen algunos defectos. Lo que se desea saber es el esfuerzo máximo que puede soportar un material, si contiene defectos de un cierto tamaño y geometría. La **tenacidad a la fractura** mide la capacidad de un material que contiene un defecto, a resistir una carga aplicada. A diferencia de los resultados del ensayo de impacto, la tenacidad a la fractura es una propiedad cuantitativa del material.

Un ensayo típico de tenacidad a la fractura se realiza aplicando un esfuerzo a la tensión a una probeta preparada con un defecto de tamaño y geometría conocidos (figura 6-16). El esfuerzo aplicado al material se intensifica por el defecto, el cual actúa como un concentrador de esfuerzos. Para un ensayo simple, el *factor de intensidad de esfuerzo*  $K$  es

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}, \quad (6-14)$$

donde  $f$  es un factor geométrico relacionado a la probeta y al defecto,  $\sigma$  es el esfuerzo aplicado, y  $a$  es el tamaño del defecto (según se define en la figura 6-16). Si se supone que la muestra es de ancho "infinito", entonces  $f \cong 1.0$ .

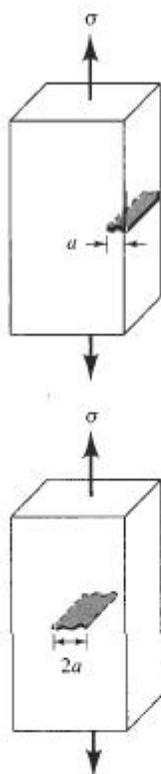
Al efectuar una prueba sobre una porción de material con un defecto de tamaño conocido, se puede determinar el valor de  $K$  que hace que dicho defecto crezca y cause la falla. Este factor de intensidad de esfuerzo crítico se define como la *tenacidad a la fractura*  $K_c$ :

$$K_c = K \text{ requerido para que una grieta se propague} \quad (6-15)$$

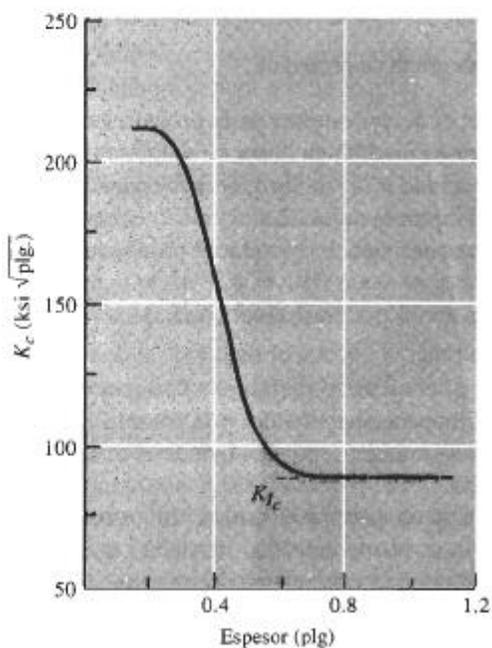
La tenacidad a la fractura depende del espesor de la probeta: conforme se incrementa el espesor, la tenacidad a la fractura  $K_c$  disminuye hasta un valor constante (figura 6-17). Esta constante se conoce como la *tenacidad a la fractura de deformación plana*  $K_{Ic}$ . Generalmente  $K_{Ic}$  se reporta como propiedad de un material. La tabla 6-6 compara el valor de  $K_{Ic}$  con el esfuerzo de cedencia para varios materiales. Las unidades para la tenacidad a la fractura son  $\text{ksi}\sqrt{\text{plg}} = 1.0989 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .

La capacidad que tiene un material para resistir el crecimiento de una grieta depende de gran número de factores:

1. Defectos más grandes reducen el esfuerzo permitido. Técnicas especiales de fabricación, como retener impurezas al filtrar metales líquidos y la compresión en caliente de partículas para producir componentes cerámicos, pueden reducir el tamaño de los defectos y mejorar la tenacidad a la fractura.
2. La capacidad de deformación de un material es crítica. En los metales dúctiles, el material cerca del extremo del defecto se puede deformar, haciendo que el extremo de cualquier grieta se redondee, reduciendo el factor de intensidad de esfuerzos, e impidiendo el crecimiento de la grieta. Al incrementar la resistencia de un material dado, por lo general se reduce su ductilidad y se obtiene una menor tenacidad a la fractura (tabla 6-6). Materiales frágiles, como los cerámicos y muchos polímeros tienen una tenacidad a la fractura menor que los metales.
3. Materiales más gruesos y más rígidos tienen una tenacidad a la fractura menor que los delgados.



**FIGURA 6-16** Dibujo esquemático de probetas con defectos en el borde e internos para medir la tenacidad a la fractura.



**FIGURA 6-17** La tenacidad a la fractura  $K_{Ic}$  de un acero con esfuerzo de cedencia de 300,000 psi se reduce al incrementar el espesor, hasta alcanzar el valor de la tenacidad a la fractura en deformación plana  $K_{Ic}$ .

- Al incrementar la rapidez de aplicación de la carga, como en el caso de un ensayo de impacto, por lo general se reduce la tenacidad a la fractura del material.

- Al aumentar la temperatura, normalmente se incrementa la tenacidad a la fractura, similar a lo que ocurre en el ensayo de impacto.
- Normalmente una estructura de granos pequeños mejora la tenacidad a la fractura, en tanto que mayor cantidad de defectos puntuales y dislocaciones reducen esta cualidad. Así, un material cerámico de grano fino puede originar una mejor resistencia al crecimiento de grietas.

**TABLA 6-6** Tenacidad a la fractura en deformación plana  $K_{Ic}$  de materiales seleccionados

Material	Tenacidad a la fractura $K_{Ic}$ (psi√plg)	Límite elástico (psi)
Aleación Al-Cu	22,000	66,000
	33,000	47,000
Ti-6% Al-4% V	50,000	130,000
	90,000	125,000
Acero Ni-Cr	45,800	238,000
	80,000	206,000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,600	30,000
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	4,500	80,000
ZrO <sub>2</sub> de mayor tenacidad por transformación	10,000	60,000
Compuesto Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -SiC	51,000	120,000
Polimetilmetacrilato	900	4,000
Policarbonato	3,000	8,400

## 6-10 La importancia de la mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura permite diseñar y seleccionar materiales y al mismo tiempo tomar en consideración la inevitable presencia de defectos. Se deben considerar tres variables: la propiedad del material ( $K_{Ic}$  o  $K_{Ic}$ ), el esfuerzo  $\sigma$  que debe resistir el material y el tamaño del defecto  $a$ . Si se conocen dos de estas variables, se puede determinar la tercera.

**Selección de un material** Si se conoce el tamaño máximo  $a$  de los defectos en el material y la magnitud del esfuerzo aplicado, se puede seleccionar un material que tenga una tenacidad  $K_{Ic}$  o  $K_{Ic}$  a la fractura, lo suficientemente grande para que impida que el defecto crezca.

**Diseño de un componente** Si se conoce el tamaño máximo de los defectos y ya se ha seleccionado el material (y por tanto  $K_{Ic}$  o  $K_{Ic}$ ), se puede calcular el esfuerzo máximo que logra resistir el componente. A partir de ahí es posible diseñar el tamaño apropiado de la pieza, para asegurarse de que no se exceda el esfuerzo máximo.

**Diseño de un método de manufactura o de ensayo** Si el material ha sido seleccionado, se conoce el esfuerzo aplicado y está determinado el tamaño del componente, se puede calcular el tamaño máximo permisible de los defectos. Una técnica de ensayo no destructivo que detecte cualquier defecto mayor de este tamaño crítico, puede ayudar a asegurarse de que la pieza funcionará con seguridad. Además, al seleccionar el proceso de manufactura correcto, se puede lograr que los defectos resulten más pequeños que este tamaño crítico.

**EJEMPLO 6-8** Diseño de un ensayo no destructivo

Una placa grande de acero utilizada en un reactor nuclear tiene una tenacidad a la fractura en condiciones de deformación plana de 80,000 psi  $\sqrt{\text{plg}}$  y está expuesta durante su operación a un esfuerzo de 45,000 psi. Diseñe un procedimiento de ensayo o de inspección capaz de detectar una grieta en la superficie de la placa antes de que ésta tenga la oportunidad de crecer a una rapidez catastrófica.

**SOLUCIÓN**

Se necesita determinar el tamaño mínimo de la grieta para que se propague en el acero bajo estas condiciones. De la ecuación 6-14, suponiendo que  $f = 1$

$$K_{Ic} = f\sigma\sqrt{a\pi}$$

$$80,000 = (1)(45,000)\sqrt{a\pi}$$

$$a = 1 \text{ plg}$$

Una grieta de 1 plg de profundidad en la superficie debe ser relativamente fácil de detectar. A menudo, grietas de ese tamaño pueden ser vistas directamente. Otras clases de ensayos, como inspección con líquidos penetrantes, inspección con partículas magnéticas, inspección con corrientes de eddy, también pueden detectar grietas mucho más pequeñas que ésta. Si la velocidad de crecimiento de una grieta es lenta y se efectúan inspecciones de manera periódica, debería descubrirse una grieta mucho antes de que llegue a este tamaño crítico. Estos ensayos se analizan en el capítulo 23.

**6-11 Ensayo de fatiga**

A menudo un componente está sujeto a la aplicación cíclica de un esfuerzo inferior al esfuerzo de cedencia del material. Este esfuerzo cíclico puede ocurrir como resultado de rotación, flexión o vibración. Aun cuando el esfuerzo esté por debajo del límite elástico, el material puede fallar después de numerosas aplicaciones de dicho esfuerzo. Este tipo de falla se conoce como **fatiga**.

Las fallas por fatiga usualmente ocurren en tres etapas: primero, se inicia una grieta minúscula, sobre la superficie, generalmente tiempo después de haberse aplicado la carga. A continuación, la grieta se propaga gradualmente, conforme la carga sigue en su alternancia. Finalmente, cuando la sección transversal restante del material resulta demasiado pequeña para soportar la carga aplicada, ocurre la fractura súbita del material.

Un método común para medir la resistencia a la fatiga de un material es el ensayo de la viga en voladizo rotatoria (figura 6-18). Uno de los extremos de la probeta cilíndrica maquinada se sujeta al eje de un motor. En el extremo opuesto se suspende un peso. Inicialmente la probeta tiene una fuerza de tensión actuando sobre la superficie superior, en tanto que la superficie inferior está sometida a compresión. Cuando la probeta gira 90°, los puntos que originalmente estaban bajo tensión y compresión no están sujetos a esfuerzo alguno. Después de una media revolución de 180°, el material originalmente bajo tensión está ahora bajo compresión. Por lo que el esfuerzo en cualquier punto pasa a través de un ciclo senoidal completo desde un esfuerzo máximo a tensión, hasta un esfuerzo máximo de compresión. El esfuerzo máximo que actúa en ese tipo de probeta está dado por

$$\sigma = \frac{10.18IF}{d^3}, \quad (6-16)$$

donde  $I$  es la longitud de la barra,  $F$  la carga y  $d$  el diámetro.

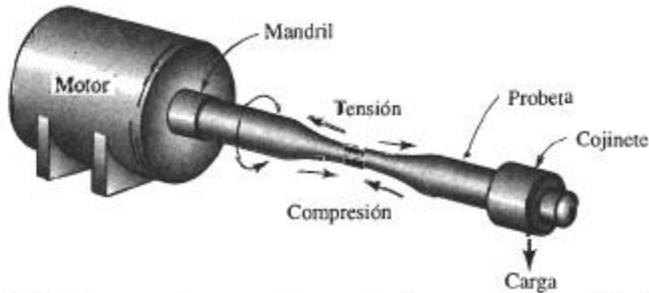


FIGURA 6-18 Ensayo de fatiga de viga en voladizo rotatoria.

Después de un número suficiente de ciclos, la probeta puede fallar. Generalmente, se prueba una serie de muestras a diferentes esfuerzos. Los resultados se presentan graficando el esfuerzo en función del número de ciclos para la falla (figura 6-19).

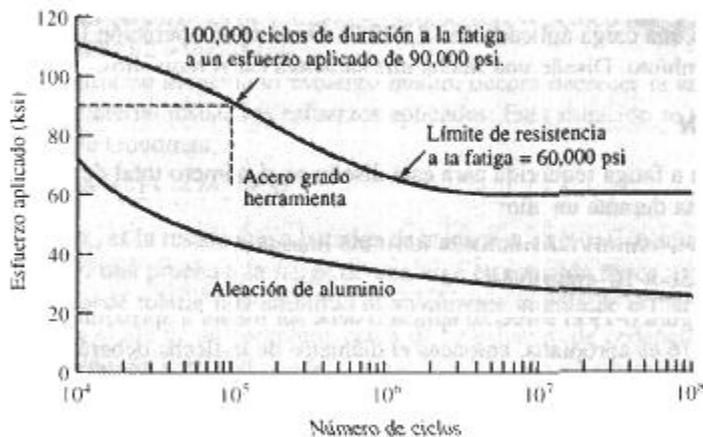


FIGURA 6-19 Las curvas esfuerzo-número de ciclos para la falla de un acero grado herramienta y una aleación de aluminio.

## 6-12 Resultados del ensayo de fatiga

El ensayo de fatiga dice el tiempo o número de ciclos que resistirá una pieza, o la carga máxima permisible que se puede aplicar para prevenir la falla del componente.

El **esfuerzo límite** para fatiga, definido como el esfuerzo por debajo del cual existe una probabilidad del 50% de que ocurrirá falla por fatiga, es el criterio de diseño preferido. Para evitar que falle una pieza de acero grado herramienta (figura 6-19), se debe asegurar que el esfuerzo aplicado esté por debajo de 60,000 psi.

La **vida a fatiga** indica cuánto resiste un componente a un esfuerzo en particular. Por ejemplo, si el acero grado herramienta (figura 6-19) se somete en forma cíclica a un esfuerzo de 90,000 psi, la vida a fatiga será de 100,000 ciclos. La **resistencia a la fatiga** es el esfuerzo máximo con el cual no ocurrirá fatiga en un número particular de ciclos, como 500,000,000. La resistencia a la fatiga es necesaria al diseñar con materiales como el aluminio y los polímeros, ya que éstos no tienen un esfuerzo límite para fatiga.

En algunos materiales, incluyendo los aceros, el esfuerzo límite para la falla por fatiga es aproximadamente la mitad de su resistencia a la tensión. La relación se conoce como **relación de fatiga**:

$$\text{Relación de fatiga} = \frac{\text{Esfuerzo límite para fatiga}}{\text{Resistencia a la tensión}} \approx 0.5 \quad (6-17)$$

La relación de fatiga permite estimar propiedades a fatiga a partir del ensayo de tensión.

La mayor parte de los materiales son *sensibles a las muescas*, siendo las propiedades a la fatiga particularmente sensibles a defectos en la superficie. Los defectos de diseño o de fabricación concentran los esfuerzos, reduciendo el esfuerzo límite para fatiga y la resistencia y vida a fatiga. Algunas veces la superficie del material debe pulirse finamente para minimizar la posibilidad de falla por fatiga.

### EJEMPLO 6-9 Diseño de una flecha giratoria

Una flecha sólida para un horno de cemento fabricada a partir del acero grado herramienta de la figura 6-19 debe tener una longitud de 96 plg y debe resistir una operación continua durante un año bajo una carga aplicada de 12,500 lb. Durante su operación la flecha efectúa una revolución por minuto. Diseñe una flecha que satisfaga estos requisitos.

#### SOLUCIÓN

La *duración a fatiga* requerida para este diseño es el número total de ciclos de carga  $N$  que sufrirá la flecha durante un año:

$$N = (1 \text{ ciclo/min})(60 \text{ min/h})(24 \text{ h/d})(365 \text{ días/año})$$

$$N = 5.256 \times 10^5 \text{ ciclos/año}$$

De la figura 6-19 el esfuerzo aplicado debe ser menor a aproximadamente 72,000 psi. Si la ecuación 6-16 es apropiada, entonces el diámetro de la flecha deberá ser

$$\sigma = \frac{10.18IF}{d^3}$$

$$72,000 \text{ psi} = \frac{(10.18)(96 \text{ plg})(12,500 \text{ lb})}{d^3}$$

$$d = 5.54 \text{ plg}$$

Una flecha de un diámetro de 5.54 plg debería operar durante un año bajo estas condiciones. Sin embargo, se debe incorporar en el diseño un factor de seguridad significativo. Además, se puede pensar en producir una flecha que jamás falle. De la figura 6-19 el esfuerzo límite para fatiga es de 60,000 psi. El diámetro mínimo requerido para evitar la falla por fatiga sería

$$60,000 \text{ psi} = \frac{(10.18)(96 \text{ plg})(12,500 \text{ lb})}{d^3}$$

$$d = 5.88 \text{ plg}$$

La selección de una flecha de un diámetro sólo un poco mayor hará menos probable que ocurra la falla por fatiga.

Naturalmente, otras consideraciones pueden ser importantes. Las altas temperaturas y un ambiente corrosivo son inherentes en la producción del cemento. Si la flecha se calienta o es atacada por el entorno corrosivo, la fatiga se acelera.

## 6-13 Aplicación de los ensayos de fatiga

A menudo los componentes se someten a condiciones de carga que no generan esfuerzos iguales a tensión que a compresión (figura 6-20). Por ejemplo, el esfuerzo máximo durante la compresión pudiera ser menor que el esfuerzo máximo a la tensión. En otros casos, la carga puede quedar entre esfuerzo de tensión máximo y mínimo; en este caso la curva de resistencia a la fatiga se presenta como amplitud del esfuerzo en función del número de ciclos para la falla. La *amplitud del esfuerzo* ( $\sigma_a$ ) se define como la mitad de la diferencia entre los esfuerzos máximo y mínimo; el *esfuerzo medio* ( $\sigma_m$ ) se define como el promedio entre los esfuerzos máximo y mínimo:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (6-18)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad (6-19)$$

Un esfuerzo de compresión es un esfuerzo "negativo". Por lo que, si el esfuerzo de tensión máximo es de 50,000 psi y el esfuerzo mínimo es un esfuerzo de compresión de 10,000 psi, la amplitud del esfuerzo es de  $[50,000 - (-10,000)]/2 = 30,000$  psi y el esfuerzo medio de  $[50,000 + (-10,000)]/2 = 20,000$  psi.

Conforme aumenta el esfuerzo medio, deberá decrecer la amplitud del esfuerzo, a fin de que el material resista los esfuerzos aplicados. Esta situación se puede resumir mediante la relación de Goodman,

$$\sigma_a = \sigma_{fs} [1 - (\sigma_m / \sigma_T)], \quad (6-20)$$

donde  $\sigma_{fs}$  es la resistencia a la fatiga deseada y  $\sigma_T$  es la resistencia a la tensión del material. Por tanto, en una prueba a la fatiga de una viga en rotación típica, donde el esfuerzo medio es cero, se puede tolerar una amplitud relativamente grande de esfuerzo sin fatiga. Sin embargo, si se carga el ala de un aeroplano cerca de su esfuerzo de cedencia (alto  $\sigma_a$ ), vibraciones de incluso pequeña amplitud pueden causar la iniciación y crecimiento de una grieta por fatiga.

**Velocidad de crecimiento de las grietas** En muchos casos, un componente pudiera no estar en peligro de falla, incluso con una grieta presente. Para estimar el tiempo de falla, resulta importante la velocidad de propagación de las grietas. La figura 6-21 muestra la velocidad de crecimiento de las grietas en función del rango del factor de intensidad de esfuerzo  $\Delta K$ , que caracteriza la geometría de la grieta y la amplitud del esfuerzo. Por debajo de un  $\Delta K$  de umbral, la grieta no crecerá; para intensidades de esfuerzo algo mayores, las grietas crecerán lentamente y, a intensidades de esfuerzos más altos, la grieta crecerá con una rapidez dada por

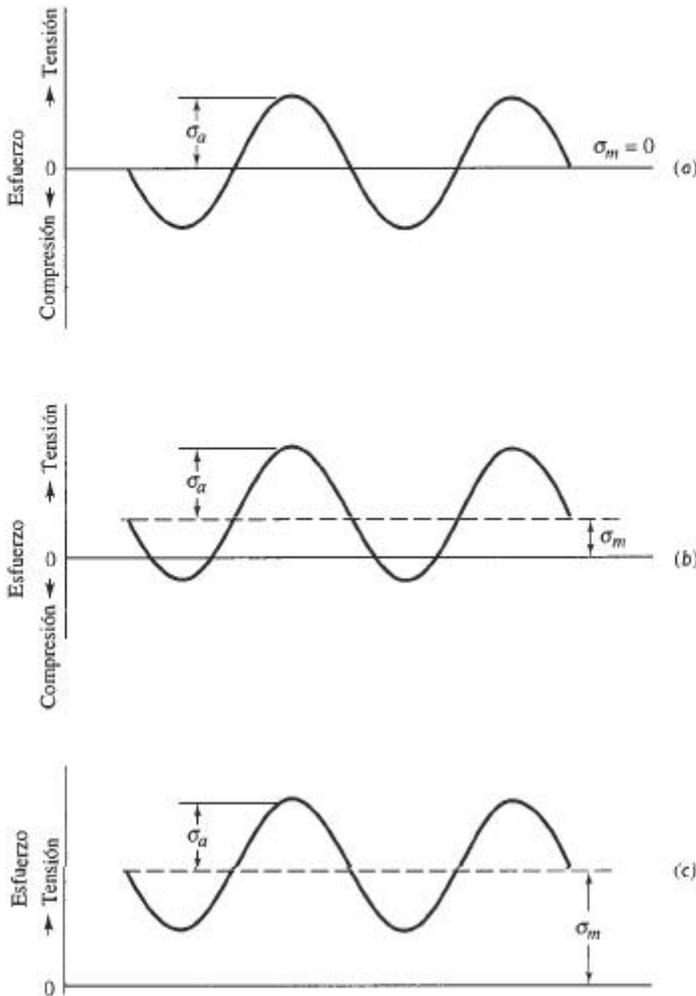
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (6-21)$$

Finalmente, cuando  $\Delta K$  es más alta, las grietas crecerán de una manera rápida e inestable hasta que ocurra la fractura.

La rapidez de crecimiento de las grietas se incrementa conforme ésta aumenta de tamaño, según lo establece el factor de intensidad de esfuerzo (ecuación 6-16):

$$\Delta K = K_{\text{máx}} - K_{\text{mín}} = f\sigma_{\text{máx}}\sqrt{\pi a} - f\sigma_{\text{mín}}\sqrt{\pi a} = f\Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (6-22)$$

Si no cambia el esfuerzo cíclico  $\Delta\sigma$ , entonces cuando la longitud  $a$  de la grieta aumenta,  $\Delta K$  y la velocidad de crecimiento de la grieta  $da/dN$  se incrementan. Sin embargo, al usar esta expresión, se deberá observar que una grieta no se propaga durante la compresión. Por lo que, si  $\sigma_{\text{mín}}$



**FIGURA 6-20** Ejemplos de esfuerzos cíclicos. (a) Esfuerzos iguales de tensión y de compresión, (b) esfuerzos de tensión mayores que de compresión, (c) todos los esfuerzos son de tensión.

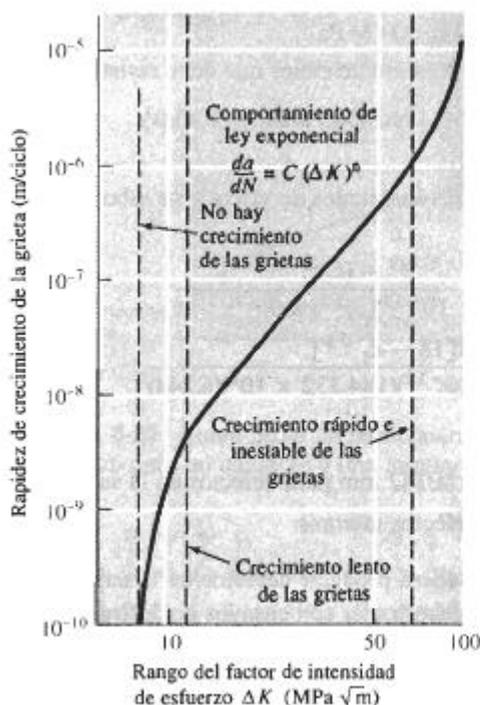
es un esfuerzo de compresión, es decir menos de cero, entonces  $\sigma_m$  deberá definirse como igual a cero.

El conocimiento de la rapidez de crecimiento de las grietas es importante para el diseño de componentes y en la evaluación no destructiva para determinar si una grieta pone en eminente peligro la estructura. Una forma de resolver este problema sería estimando el número de ciclos requeridos antes de que ocurra la ruptura. Mediante la reorganización de la ecuación 6-21 y sustituyendo a  $\Delta K$

$$dN = \frac{1}{Cf^n \Delta \sigma^n \pi^{n/2}} \frac{da}{a^{n/2}}$$

Si se integra esta expresión desde el tamaño inicial de la grieta hasta el tamaño requerido para que la fractura ocurra, se encontrará que

$$N = \frac{2[(a_c)^{(2-n)/2} - (a_i)^{(2-n)/2}]}{(2-n)Cf^n \Delta \sigma^n \pi^{n/2}}, \tag{6-23}$$



**FIGURA 6-21** Crecimiento de las grietas en función del rango del factor de intensidad de esfuerzo, para un acero de alta resistencia. Para este acero,  $C = 1.62 \times 10^{-12}$  y  $n = 3.2$  para las unidades que se muestran.

donde  $a_i$  es el tamaño inicial del defecto y  $a_c$  es el tamaño crítico de la grieta para que ocurra falla catastrófica. Si se conocen las constantes  $n$  y  $C$  del material de la ecuación 6-21, se puede estimar el número de ciclos requeridos para un esfuerzo cíclico dado (ejemplo 6-10).

### EJEMPLO 6-10

### Diseño de una placa resistente a la fatiga

Una placa de acero de alta resistencia (figura 6-21) que tiene una tenacidad a la fractura en deformación plana de  $80 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , se somete a un esfuerzo cíclico de  $500 \text{ MPa}$  a tensión y  $60 \text{ MPa}$  a compresión. La placa debe tener una vida de 10 años, aplicándose los esfuerzos cada 5 minutos. Diseñe un procedimiento de manufactura y ensayo que asegure que el componente dará el servicio pretendido.

### SOLUCIÓN

Para diseñar la capacidad de fabricación y de ensayo, se debe determinar el tamaño máximo de las grietas o defectos que pueden originar la ruptura de la placa en un periodo de 10 años. El tamaño crítico de las grietas ( $a_c$ ), utilizando la tenacidad a la fractura y el esfuerzo máximo, es,

$$K_{Ic} = f\sigma\sqrt{\pi a_c}$$

$$80 \text{ MPa}\sqrt{m} = (1)(500 \text{ MPa})\sqrt{\pi a_c}$$

$$a_c = 0.0081 \text{ m} = 8.1 \text{ mm}$$

El esfuerzo máximo es de  $500 \text{ MPa}$ ; sin embargo, el esfuerzo mínimo es cero y no  $60 \text{ MPa}$  de compresión, ya que durante la compresión las grietas no se propagan. Por lo que  $\Delta\sigma$  es

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 500 - 0 = 500 \text{ MPa}$$

Se necesita determinar el número mínimo de ciclos que debe resistir esta placa:

$$N = (1 \text{ ciclo}/5 \text{ min})(60 \text{ min}/\text{h})(24 \text{ h}/\text{d})(365 \text{ d}/\text{año})(10 \text{ años})$$

$$N = 1,051,200 \text{ ciclos}$$

Si se asume que  $f = 1$  para todas las longitudes de grieta y se sabe que  $C = 1.62 \times 10^{-12}$  y  $n = 3.2$  en la ecuación 6-21, entonces

$$1,051,200 = \frac{2[(0.0081)^{(2-3.2)/2} - (a_i)^{(2-3.2)/2}]}{(2-3.2)(1.62 \times 10^{-12})(1)^{3.2}(500)^{3.2}\pi^{3.2/2}}$$

$$1,051,200 = \frac{2[18 - a_i^{-0.6}]}{(-1.2)(1.62 \times 10^{-12})(1)(4.332 \times 10^8)(6.244)}$$

$$a_i^{-0.6} = 18 + 2764 = 2782$$

$$a_i = 1.82 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.00182 \text{ mm para defectos en la superficie}$$

$$2a_i = 0.00364 \text{ mm para defectos internos}$$

El proceso de manufactura deberá producir defectos en la superficie menores a 0.00182 mm de profundidad. Además, se debe contar con ensayos no destructivos para asegurar que no estén presentes grietas que excedan esta longitud. ■

**Efecto de la temperatura** Conforme se incrementa la temperatura del material, se reducen tanto la vida a fatiga como el esfuerzo límite para fatiga. Además, un cambio cíclico en la temperatura provoca falla por fatiga térmica; cuando se calienta el material de manera no uniforme, algunas partes de la estructura se dilatarán más que otras. Esta expansión no uniforme introduce un esfuerzo en el interior del material y, cuando posteriormente la estructura se enfría y se contrae, se producirán esfuerzos de signo opuesto. Como consecuencia de los esfuerzos y las deformaciones inducidas térmicamente, puede ocurrir finalmente la falla por fatiga.

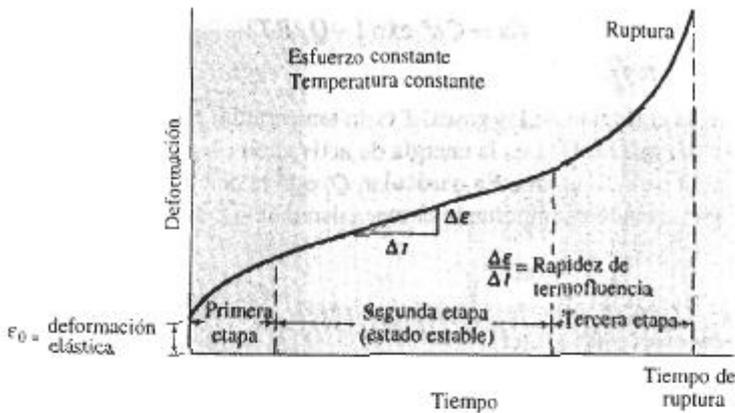
La frecuencia con la cual se aplica el esfuerzo también tiene influencia sobre el comportamiento a fatiga. En particular, los esfuerzos de alta frecuencia pueden causar que se calienten los materiales poliméricos; a una temperatura mayor, los polímeros fallarán más rápido.

## 6-14 Ensayo de termofluencia

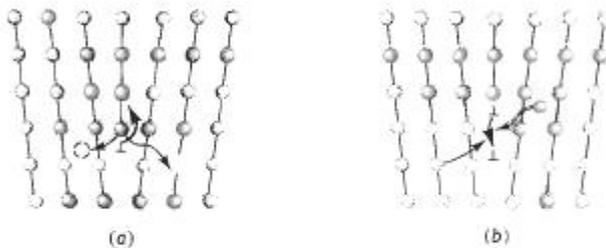
Si se aplica un esfuerzo a un material que está a una temperatura elevada, éste puede estirarse y finalmente fallar, aun cuando el esfuerzo aplicado sea *menor* que el del esfuerzo de cedencia a dicha temperatura. La **deformación plástica** a alta temperatura se conoce como termofluencia.

Para determinar el comportamiento de un material, se utiliza el ensayo de **termofluencia**, en el cual se aplica un esfuerzo constante a una probeta calentada a alta temperatura. En cuanto se aplica el esfuerzo, la probeta se deforma elásticamente una pequeña cantidad  $\epsilon_0$  (figura 6-22) que depende del esfuerzo aplicado y del módulo de elasticidad del material a esa temperatura.

**Ascenso de las dislocaciones** Las altas temperaturas permiten que las **dislocaciones** en el interior de un metal asciendan. En este caso, los átomos se mueven a uno y otro lado de la línea de dislocación debido al fenómeno de la difusión, haciendo que la dislocación se mueva en dirección perpendicular y no paralela al plano de deslizamiento (figura 6-23). La dislocación se escapa entonces de las imperfecciones de red, continuando su deslizamiento y causando una deformación adicional de la pieza, incluso ante bajos esfuerzos aplicados.



**FIGURA 6-22** Curva típica de termofluencia mostrando la deformación producida en función del tiempo para un esfuerzo y una temperatura constante.



**FIGURA 6-23** Las dislocaciones pueden ascender y alejarse de los obstáculos, cuando los átomos se apartan de la línea de dislocación para crear intersticios o para llenar vacancias (a) o cuando los átomos se fijan a la línea de dislocación creando vacancias o eliminando intersticios (b).

**Termofluencia y tiempo de ruptura** Durante el ensayo de termofluencia, la deformación o elongación se mide en función del tiempo y se grafica a fin de obtener la curva de termofluencia (figura 6-22). En la primera etapa de termofluencia de los metales, muchas dislocaciones ascienden venciendo obstáculos, se deslizan y contribuyen a la deformación. Finalmente, la rapidez a la cual las dislocaciones esquivan obstáculos es igual a la velocidad a la cual las dislocaciones son bloqueadas por otras imperfecciones. Esto lleva a una segunda etapa, de termofluencia en estado estable. La pendiente de la porción estable de la curva de termofluencia es la **rapidez de termofluencia**:

$$\text{Rapidez de termofluencia} = \frac{\Delta \text{ deformación}}{\Delta \text{ tiempo}} \quad (6-24)$$

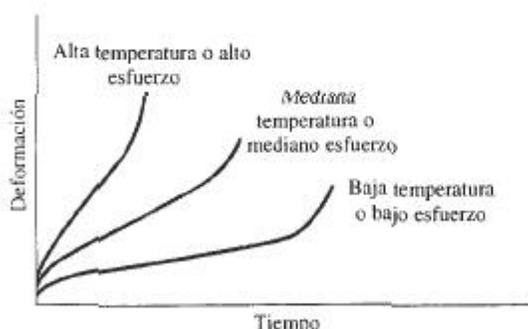
Finalmente, durante la tercera etapa de la termofluencia empieza el encuellamiento, el esfuerzo se incrementa y la muestra se deforma a una rapidez acelerada, hasta que ocurre la falla. El tiempo que se requiere para que esto ocurra es el **tiempo de ruptura**. Un esfuerzo más alto o una temperatura mayor reducen el tiempo de ruptura, incrementando la rapidez de termofluencia (figura 6-24).

La influencia combinada del esfuerzo aplicado y de la temperatura sobre la rapidez de termofluencia y sobre el tiempo de ruptura ( $t_r$ ) sigue una relación de Arrhenius

$$\text{Rapidez de termofluencia} = C\sigma^n \exp(-Q_c/RT) \quad (6-25)$$

$$t_r = K\sigma^m \exp(Q_m/RT) \quad (6-26)$$

donde  $R$  es la constante de los gases,  $T$  es la temperatura en grados Kelvin, y  $C$ ,  $K$ ,  $n$ , y  $m$  son constantes del material.  $Q_c$  es la energía de activación para la termofluencia y  $Q_m$  es la energía de activación para la ruptura. En particular,  $Q_m$  está relacionada con la energía de activación de autodifusión, cuando es importante el mecanismo de ascenso de las dislocaciones.



**FIGURA 6-24** Efecto de la temperatura o del esfuerzo aplicado sobre la curva de termofluencia.

En los materiales cerámicos cristalinos, son de particular importancia otros factores, como el deslizamiento de bordes de grano y la nucleación de microgrietas. A menudo, en los bordes de grano está presente un material no cristalino, es decir vítreo; la energía de activación que se requiere para que se deforme el vidrio es baja, lo que lleva a una gran rapidez de termofluencia en comparación con materiales cerámicos totalmente cristalinos. Por la misma razón, la termofluencia ocurre a gran rapidez en vidrios cerámicos y en polímeros amorfos.

## 6-15 Uso de los datos de termofluencia

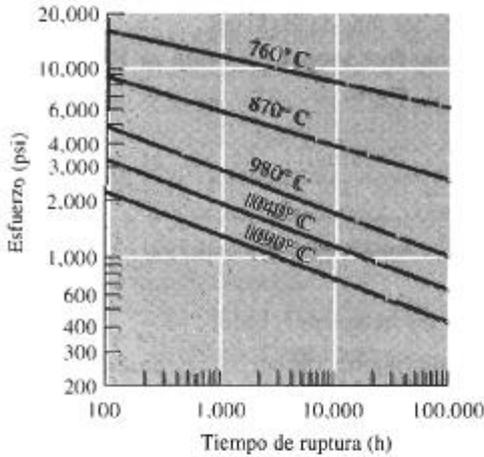
Las **curvas esfuerzo-ruptura** que se muestran en la figura 6-25(a) permiten estimar la vida esperada de un componente para una combinación esfuerzo y temperatura particular. El parámetro de **Larson-Miller**, que se ilustra en la figura 6-25(b), es el usado para condensar la relación-esfuerzo-temperatura tiempo de ruptura en una sola curva. El parámetro de Larson-Miller (L.M.) es

$$\text{L.M.} = (T/1000)(A + B \ln t), \quad (6-27)$$

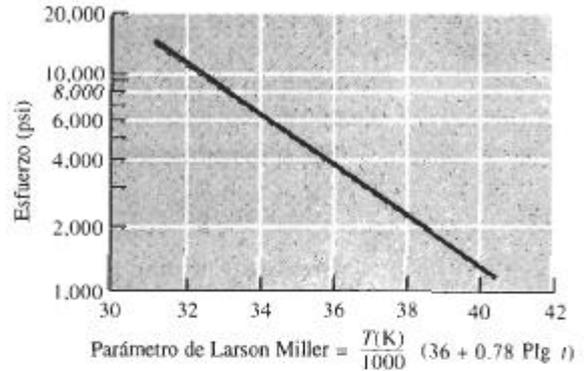
donde  $T$  está en grados Kelvin,  $t$  es el tiempo en horas, y  $A$  y  $B$  son constantes que dependen del material.

### **EJEMPLO 6-11** Diseño de un eslabón para cadena

Diseñe una cadena de hierro fundido dúctil (figura 6-26) para operar en un horno para ladrillos cerámicos. El horno tiene que operar sin ruptura durante 5 años a 600°C, con una carga aplicada de 5,000 lb.

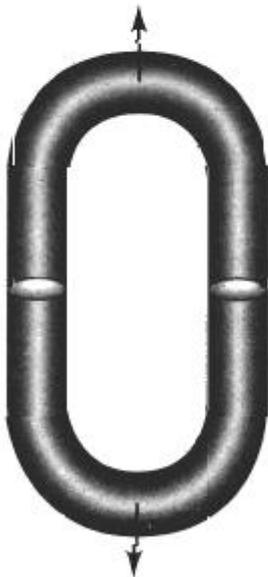


(a)



(b)

**FIGURA 6-25** Resultados de una serie de ensayos de termofluencia: (a) Curvas de esfuerzo-tiempo de ruptura para una aleación de hierro-cromo-níquel; (b) parámetro de Larson-Miller para el hierro fundido dúctil.



**FIGURA 6-26** Boceto de un eslabón de cadena (para el ejemplo 6-11).

### SOLUCIÓN

El parámetro de Larson-Miller para el hierro fundido dúctil es

$$\text{L.M.} = \frac{T(36 + 0.78 \text{ Plg } t)}{1000}$$

La cadena debe durar 5 años, es decir

$$t = (24 \text{ h/d}) (365 \text{ d/año}) (5 \text{ años}) = 43,800 \text{ h}$$

$$\text{L.M.} = \frac{(600 + 273)[36 + 0.78 \text{ Plg } (43,800)]}{1000} = 38.7$$

De la figura 6-25(b), el esfuerzo aplicado no debe ser más de 2000 psi.

El área transversal total de la cadena, requerida para soportar la carga de 5000 lb es

$$A = F/\sigma = \frac{5000 \text{ lb}}{2000 \text{ psi}} = 2.5 \text{ plg}^2$$

El área transversal de cada "mitad" del eslabón de hierro es entonces de  $1.25 \text{ plg}^2$  y, suponiendo que se trata de una sección transversal circular

$$d^2 = (4/\pi)A = (4/\pi)(1.25) = 1.59$$

$$d = 1.26 \text{ plg}$$

## RESUMEN

El comportamiento mecánico de los materiales se describe a través de sus propiedades mecánicas, que son resultado de ensayos simples e idealizados. Estos ensayos están diseñados para representar distintos tipos de condiciones de carga. Las propiedades de un material que aparecen reportadas en diversos manuales, son los resultados de estas pruebas. En consecuencia, se debe recordar siempre que los valores de los manuales son valores promedio, obtenidos a partir de pruebas ideales y, por tanto, deberán ser utilizados con cierta precaución.

- El ensayo de tensión describe la resistencia de un material a un esfuerzo aplicado lentamente. Entre las propiedades importantes están el esfuerzo de cedencia (el esfuerzo al cual el material empieza a deformarse de manera permanente), la resistencia a la tensión (el esfuerzo que corresponde a la carga máxima aplicada), el módulo de elasticidad (la pendiente de la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación), y el porcentaje de elongación, así como el porcentaje de reducción de área (siendo ambas medidas de la ductilidad del material).
- El ensayo de flexión se utiliza para determinar las propiedades a tensión de materiales frágiles. De ahí se puede obtener el módulo de elasticidad en flexión y la resistencia a la flexión (similar a la resistencia a la tensión).
- El ensayo de dureza mide la resistencia de un material a la penetración y da una medida de su resistencia al desgaste y a la abrasión. Comúnmente se utilizan varios ensayos de dureza, incluyendo los ensayos Rockwell y Brinell. A menudo la dureza se relaciona con otras propiedades mecánicas, particularmente con la resistencia a la tensión.
- El ensayo de impacto describe la respuesta de un material a una carga aplicada rápidamente. Los ensayos Charpy e Izod son típicos. La energía que se requiere para fracturar la probeta se mide y puede utilizarse como base de comparación de diversos materiales, probados bajo las mismas condiciones. Además, se puede determinar una temperatura de transición por encima de la cual el material fallará de manera dúctil, en vez de fallar de manera frágil.
- La tenacidad a la fractura describe la facilidad con la cual se propaga una grieta o defecto en un material. La tenacidad a la fractura medida en condiciones de deformación plana  $K_{Ic}$  es un resultado común de estas pruebas.
- El ensayo de fatiga permite comprender el comportamiento de un material cuando se le aplica un esfuerzo cíclico. Propiedades importantes incluyen el esfuerzo límite para fatiga (esfuerzo por debajo del cual nunca ocurrirá la ruptura), resistencia a la fatiga (el esfuerzo máximo para que la falla ocurra en un número dado de ciclos) y la vida en fatiga (número de ciclos que resistirá un material a un esfuerzo dado). También puede ayudar a determinar la vida en fatiga el conocer la rapidez de crecimiento de las grietas en el material.
- El ensayo de termofluencia proporciona información sobre la capacidad de un material para soportar cargas a altas temperaturas. La rapidez de termofluencia y el tiempo de ruptura son propiedades importantes obtenidas a partir de estos ensayos.

## GLOSARIO

**Ascenso** Movimiento de una dislocación en sentido perpendicular al plano de deslizamiento, debido a la difusión de átomos provenientes de o que van a la línea de dislocación.

**Carga** Fuerza aplicada a un material durante un ensayo mecánico.

**Curva esfuerzo-ruptura** Método para reportar los resultados de una serie de ensayos de termofluencia, graficando el esfuerzo aplicado en función del tiempo de ruptura.

**Deformación elástica** Alteración del material que se recupera al eliminar la fuerza aplicada.

**Deformación ingenieril** Cantidad que se deforma un material por unidad de longitud en un ensayo de tensión.

**Ductilidad** Capacidad del material a deformarse de manera permanente sin romperse, cuando se le aplica una fuerza.

**Deformación plástica** Alteración permanente de un material al aplicársele una carga y después quitarla.

**Deformación real** Alteración del material, dada por  $\epsilon_r = \ln(l/l_0)$ , producida en un material.

**Elongación %** Incremento porcentual total en la longitud de una probeta durante un ensayo de tensión.

**Ensayo de dureza** Mide la resistencia de un material a la penetración causada por un objeto puntiagudo. Los ensayos de dureza comunes son el ensayo Brinell, el ensayo Rockwell, el ensayo Knoop y el ensayo Vickers.

**Ensayo de fatiga** Mide la resistencia de un material a fatiga, cuando se aplica de manera cíclica un esfuerzo por debajo del esfuerzo de cedencia.

**Ensayo de flexión** Aplicación de una fuerza en el centro de una barra soportada en cada uno de sus extremos, para determinar la resistencia del material a una carga estática o aplicada lentamente. Típicamente se utiliza en el caso de materiales frágiles.

**Energía de impacto** Energía requerida para fracturar una probeta estándar cuando la carga se aplica súbitamente.

**Ensayo de impacto** Mide la capacidad de un material para absorber la aplicación súbita de una carga sin romperse. El ensayo Charpy es muy común.

**Ensayo de tensión** Mide la respuesta de un material a una fuerza uniaxial aplicada lentamente. De ahí se obtiene el esfuerzo de cedencia, la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y la ductilidad del material.

**Esfuerzo de cedencia** Esfuerzo aplicado a un material que apenas comienza a crear una deformación plástica permanente.

**Esfuerzo de cedencia convencional** Medida del esfuerzo de cedencia que se obtiene de manera gráfica y que describe el esfuerzo que genera una cantidad específica de deformación plástica.

**Esfuerzo ingenieril** La carga o fuerza aplicada dividida entre el área de la sección transversal original del material.

**Esfuerzo real** La carga dividida entre el área real de la sección transversal de la probeta a dicha carga.

**Ensayo de termofluencia** Mide la resistencia de un material en función de deformación y falla, cuando está a una temperatura elevada y sujeto a una carga estática por debajo de su esfuerzo de cedencia.

**Ley de Hooke** Relación entre el esfuerzo y la deformación en la porción elástica de la curva esfuerzo-deformación.

**Límite de esfuerzo para fatiga** Esfuerzo por debajo del cual un material no fallará en un ensayo de fatiga.

**Mecánica de la fractura** Estudio de la capacidad de un material para soportar esfuerzos en presencia de un defecto o grieta.

**Módulo de elasticidad** También llamado Módulo de Young, es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en su región elástica.

**Módulo en flexión** Módulo de elasticidad calculado a partir de los resultados de un ensayo de flexión. Pendiente de la curva esfuerzo-deflexión.

**Módulo de resiliencia** Máxima energía elástica absorbida por un material al aplicársele una carga.

**Reducción de área (%)** Disminución total porcentual del área de la sección transversal de una probeta durante un ensayo de tensión.

**Rapidez de termofluencia** Velocidad a la cual el material se deforma al aplicársele un esfuerzo a alta temperatura.

**Relación de Poisson** Relación entre la deformación lateral y longitudinal en la región elástica.

**Relación de fatiga** Esfuerzo límite para fatiga dividido entre la resistencia a la tensión del material. La relación en muchos metales ferrosos es de aproximadamente 0.5.

**Resistencia a la fatiga** Esfuerzo requerido para causar falla por fatiga en un número dado de ciclos, como por ejemplo, 500 millones de ciclos.

**Resistencia a la flexión** Esfuerzo requerido para fracturar una probeta en un ensayo de flexión. También conocido como módulo de ruptura.

**Resistencia a la tensión** Esfuerzo que corresponde a la carga máxima en un ensayo de tensión.

**Rigidez** Medida cualitativa de la deformación elástica producida en un material. Un material rígido tiene un módulo de elasticidad elevado.

**Sensibilidad a las muescas** Mide el efecto de una muesca, rayadura u otra imperfección en las propiedades de un material como su tenacidad o su esfuerzo límite para fatiga.

**Temperatura de transición** Grado térmico por debajo del cual un material se comporta de manera frágil en un ensayo de impacto.

**Tenacidad** Medida cualitativa de las propiedades de impacto de un material. Un material que resiste la ruptura por impacto se dice que es tenaz.

**Tenacidad a la fractura** Resistencia de un material a la falla en presencia de un defecto o grieta.

**Tiempo de ruptura** Periodo requerido para que falle una muestra por termofluencia a una temperatura y esfuerzo particular.

**Parámetro de Larson-Miller** Parámetro utilizado para relacionar el esfuerzo, la temperatura y el tiempo de ruptura en la termofluencia.

**Vida a fatiga** Número de ciclos posibles bajo un esfuerzo particular, antes de que el material falle por fatiga.

**Zona de estricción** Deformación local en una probeta sometida a tensión. La estricción se inicia en el punto de tensión.

## PROBLEMAS

**6-1** A un alambre de níquel de 0.15 plg de diámetro con un esfuerzo de cedencia de 45,000 psi y una resistencia a la tensión de 55,000 psi se le aplica una fuerza de 850 libras. Determine

(a) si el alambre se deformará plásticamente

(b) si el alambre sufrirá encuellamiento.

**6-2** A una barra de hierro de  $10 \times 20$  mm con esfuerzo de cedencia de 400 MPa y una resistencia a la tensión de 480 MPa se le aplica una fuerza de 100,000 N. Determine

(a) si la barra se deformará plásticamente

(b) si la barra sufrirá encuellamiento.

**6-3** Calcule la fuerza máxima que puede soportar una varilla de 0.2 plg de diámetro de  $Al_2O_3$ , con un esfuerzo de cedencia de 35,000 psi, sin deformación plástica. Exprese su respuesta en libras y en newtons.

**6-4** Una fuerza de 20,000 N sobre una barra de magnesio de  $1 \times 1$  cm causará su alargamiento de 10 cm a 10.045 cm. Calcule el módulo de elasticidad, tanto en GPa como en psi.

**6-5** Las dimensiones de una barra de polímero son  $1 \times 2 \times 15$  plg. El polímero tiene un módulo de elasticidad de 600,000 psi. ¿Qué fuerza se requerirá para alargar elásticamente la barra hasta 15.25 plg?

**6-6** Una placa de aluminio de 0.5 cm de espesor debe resistir una fuerza de 50,000 N sin deformación permanente. Si el aluminio tiene un esfuerzo de cedencia de 125 MPa, ¿cuál es el ancho mínimo de la placa?

**6-7** Una varilla de cobre de 3 plg de diámetro tiene que ser reducida a 2 plg de diámetro, haciéndola pasar por una abertura. Para tomar en consideración la deformación elástica, ¿cuál deberá ser el diámetro de la abertura? El módulo de elasticidad del cobre es de  $17 \times 10^6$  psi y su esfuerzo de cedencia es de 40,000 psi.

**6-8** Una hoja de magnesio de 0.15 cm de espesor, 8 cm de ancho y 5 m de largo debe estirarse hasta una longitud final de 6.2 m. ¿Cuál será la longitud de la hoja antes de que se libere el esfuerzo aplicado? El módulo de elasticidad del magnesio es de 45 GPa y su esfuerzo de cedencia es de 200 MPa.

**6-9** Un cable de acero de 1.25 plg de diámetro y de 50 pies de largo debe levantar una carga de 20 ton. ¿Cuál será la longitud del cable durante el levantamiento? El módulo de elasticidad del acero es  $30 \times 10^6$  psi.

**6-10** Los siguientes datos fueron reunidos a partir del ensayo estándar de tensión en una probeta de 0.505 plg de diámetro de una aleación de cobre:

Carga (lb)	Longitud calibrada (plg)
0	2.00000
3,000	2.00167
6,000	2.00333
7,500	2.00417
9,000	2.0090
10,500	2.040
12,000	2.26
12,400	2.50 (carga máxima)
11,400	3.02 (fractura)

Después de la fractura, la longitud calibrada de la muestra es de 3.014 plg y su diámetro de 0.374 plg.

Grafique los datos y calcule

(a) el esfuerzo de cedencia convencional al 0.2%,

(b) la resistencia a la tensión,

(c) el módulo de elasticidad,

(d) la elongación (%),

(e) la reducción de área (%),

(f) el esfuerzo ingenieril a la fractura,

(g) el esfuerzo real a la fractura, y

(h) el módulo de resiliencia.

**6-11** Los siguientes datos fueron obtenidos del ensayo de tensión de una probeta de 0.4 plg de diámetro de cloruro de polivinilo.

Carga (lb)	Longitud calibrada (plg)
0	2.00000
300	2.00746
600	2.01496
900	2.02374
1200	2.032
1500	2.046
1660	2.070 (carga máxima)
1600	2.094
1420	2.12 (fractura)

Después de la fractura, la longitud calibrada es de 2.09 plg y el diámetro es de 0.393 plg. Grafique los datos y calcule

(a) el esfuerzo de cedencia convencional al 0.2%,

(b) la resistencia a la tensión,

(c) el módulo de elasticidad,

(d) la elongación,

(e) la reducción en área,

(f) el esfuerzo ingenieril a la fractura,

(g) el esfuerzo real a la fractura, y

(h) el módulo de resiliencia.

**6-12** Los datos siguientes fueron obtenidos a partir del ensayo de tensión de una probeta de 12 mm de diámetro de magnesio:

Carga (N)	Longitud calibrada (mm)
0	30.0000
5,000	30.0296
10,000	30.0592
15,000	30.0888
20,000	30.15
25,000	30.51
26,500	30.90
27,000	31.50 (carga máxima)
26,500	32.10
25,000	32.79 (fractura)

Después de la fractura, la longitud calibrada es de 32.61 mm y el diámetro es de 11.74 mm. Grafique los datos y calcule

- (a) el esfuerzo de cedencia convencional al 0.2%,
- (b) la resistencia a la tensión,
- (c) el módulo de elasticidad,
- (d) la elongación,
- (e) la reducción de área,
- (f) el esfuerzo ingenieril,
- (g) el esfuerzo real a la fractura, y
- (h) el módulo de resiliencia.

**6-13** Los datos siguientes fueron obtenidos a partir del ensayo de tensión de una probeta de 20 mm de diámetro de un hierro fundido dúctil.

Carga (N)	Longitud calibrada (mm)
0	40.0000
25,000	40.0185
50,000	40.0370
75,000	40.0555
90,000	40.20
105,000	40.60
120,000	41.56
131,000	44.00 (carga máxima)
125,000	47.52 (fractura)

Después de la fractura, la longitud calibrada es de 47.42 mm y el diámetro es de 18.35 mm. Grafique los datos y calcule

- (a) el esfuerzo de cedencia convencional al 0.2%,
- (b) la resistencia a la tensión,
- (c) el módulo de elasticidad,
- (d) la elongación,
- (e) la reducción de área,
- (f) el esfuerzo ingenieril a la fractura,
- (g) el esfuerzo real a la fractura, y
- (h) el módulo de resiliencia.

**6-14** Una barra de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que tiene 0.25 plg de espesor, 0.5 plg de ancho y 9 plg de largo es probada en un aparato de flexión de tres puntos, con los soportes localizados a una distancia de 6 plg. La deflexión en la parte central de la barra se mide en función de la carga aplicada. Los datos aparecen a continuación. Determine la resistencia a la flexión y el módulo en flexión.

**6-15** Una barra de titanio de 0.4 plg de diámetro y 12 plg de largo tiene un esfuerzo de cedencia de 50,000 psi, un módulo de elasticidad de  $16 \times 10^6$  psi y una relación de Poisson de 0.30. Determine la longitud y el diámetro de la barra cuando se le haya aplicado una carga de 500 libras.

Fuerza (lb)	Deflexión (plg)
14.5	0.0025
28.9	0.0050
43.4	0.0075
57.9	0.0100
86.0	0.0149 (fractura)

**6-16** Cuando se aplica una carga de tensión a una barra de cobre de 1.5 cm de diámetro, el diámetro queda reducido a 1.498 cm. Determine la carga aplicada, utilizando los datos de la tabla 6-3.

**6-17** Se lleva a cabo un ensayo de flexión de tres puntos en un bloque de  $\text{ZrO}_2$  que tiene 8 plg de largo, 0.50 plg de ancho, 0.25 plg de espesor y apoyado sobre dos soportes separados 4 plg entre sí. Cuando se le aplica una fuerza de 400 lb, la muestra se flexiona 0.037 plg y se rompe. Calcule

- (a) la resistencia a la flexión
- (b) el módulo en flexión, suponiendo que no ocurre deformación plástica.

**6-18** Se efectúa un ensayo de flexión de tres puntos en un bloque de carburo de silicio que tiene 10 cm de largo, 1.5 cm de ancho y 0.6 cm de espesor, y que está apoyado en dos soportes separados 7.5 cm. La muestra se rompe cuando se registra una flexión de 0.09 mm. El módulo en flexión del carburo de silicio es de 480 GPa. Suponga que no ha ocurrido deformación plástica. Calcule

- (a) la fuerza que causó la fractura y
- (b) la resistencia a la flexión.

**6-19** Un polímero termoestable reforzado con esferitas de vidrio debe flexionarse 0.5 mm al aplicársele una fuerza de 500 N. La pieza de polímero tiene un ancho de 2 cm, un espesor de 0.5 cm y 10 cm de largo. Si el módulo en flexión es de 6.9 GPa, determine la distancia mínima entre soportes. ¿Se fracturará el polímero si su resistencia a la flexión es de 85 MPa? Suponga que no ocurre deformación plástica.

**6-20** El módulo en flexión de la alúmina es  $45 \times 10^6$  psi y su resistencia a la flexión 46,000 psi. Una barra de alúmina de un espesor de 0.3 plg, 1.0 plg de ancho y 10 plg de largo se coloca en soportes separados 7 plg. Determine la deflexión en el momento en que se rompe la barra, suponiendo que no ocurra deformación plástica.

**6-21** Una medición de la dureza Brinell, utilizando un penetrador de 10 mm de diámetro y una carga de 500 kg, produce una penetración de 4.5 mm en una placa de aluminio. Determine el número de dureza Brinell (HB) del metal.

**6-22** Cuando se aplica una carga de 3000 kg a una esfera de 10 mm de diámetro en la prueba Brinell en un acero, se produce una penetración de 3.1 mm. Estime la resistencia a la tensión del acero.

**6-23** Los datos que siguen fueron obtenidos de una serie de ensayos de impacto Charpy efectuados sobre cuatro aceros, cada uno de ellos con un contenido distinto de magnesio. Grafique los datos y determine

(a) la temperatura de transición (determinada como la media de las energías absorbidas en las regiones dúctil y frágil), y

(b) la temperatura de transición (definida como la temperatura que proporcionan 50 J de energía absorbida). Grafique la temperatura de transición en función del contenido de manganeso y analice el efecto de dicho elemento sobre la tenacidad del acero. ¿Cuál sería el contenido de manganeso mínimo posible en el acero si una pieza fabricada con él debe utilizarse a 0°C?

Temperatura de ensayo °C	Energía de impacto (J)			
	0.30% Mn	0.39% Mn	1.01 % Mn	1.55% Mn
-100	2	5	5	15
-75	2	5	7	25
-50	2	12	20	45
-25	10	25	40	70
0	30	55	75	110
25	60	100	110	135
50	105	125	130	140
75	130	135	135	140
100	130	135	135	140

**6-24** Los datos siguientes se obtuvieron a partir de una serie de pruebas de impacto Charpy efectuadas sobre cuatro hierros fundidos dúctiles, cada uno con un contenido de silicio diferente. Grafique los datos y determine

(a) la temperatura de transición (definida como la media de la energía absorbida en las regiones dúctil y frágil) y

(b) la temperatura de transición (definida como la temperatura que proporciona 10 J de energía absorbida). Grafique la temperatura de transición en función del contenido de silicio y analice el efecto de éste en la tenacidad del hierro fundido. ¿Cuál sería el contenido

máximo de silicio permisible en el hierro fundido, si una pieza debe ser utilizada a 25°C?

Temperatura de ensayo °C	Energía de impacto (J)			
	2.55% Si	2.85% Si	3.25% Si	3.63% Si
-50	2.5	2.5	2	2
-25	3	2.5	2	2
0	6	5	3	2.5
25	13	10	7	4
50	17	14	12	8
75	19	16	16	13
100	19	16	16	16
125	19	16	16	16

**6-25** A menudo se recomiendan metales CCC para su uso a bajas temperaturas, particularmente cuando se esperan cargas de impacto inesperadas en la pieza. Explique.

**6-26** Una pieza de acero puede fabricarse mediante metalurgia de polvos (compactando partículas de polvo de hierro y sinterizándolas para producir un sólido), o mediante maquinado a partir de un bloque de acero sólido. ¿Cuál de las piezas se espera tenga la tenacidad más alta? Explique.

**6-27** Varias aleaciones de aluminio-silicio tienen una estructura que incluye placas frágiles de silicio con bordes agudos en una matriz más blanda y dúctil del aluminio. ¿Esperaría usted que estas aleaciones fueran sensibles a las muescas en una prueba de impacto? ¿Esperaría usted que estas aleaciones tuvieran una buena tenacidad? Explique sus respuestas.

**6-28** La alúmina  $Al_2O_3$  es un material cerámico frágil con baja tenacidad. Suponga que dentro de la alúmina se tienen fibras de carburo de silicio  $SiC$ , otro cerámico frágil de baja tenacidad. ¿Afectaría la tenacidad del compuesto de matriz cerámica? Explique. (Estos materiales se analizarán en capítulos posteriores.)

**6-29** Un compuesto de matriz cerámico contiene defectos internos tan grandes como 0.001 cm de longitud. La tenacidad a la fractura en deformación plana del compuesto es  $45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  y la resistencia a la tensión es 550 MPa. ¿Hará el esfuerzo que falle el compuesto antes de que se alcance la resistencia a la tensión? Suponga que  $f = 1$ .

**6-30** Una aleación de aluminio tiene una tenacidad a la fractura en deformación plana de  $25,000 \text{ psi}\sqrt{\text{plg}}$  y falla cuando se le aplica un esfuerzo de 42,000 psi. La observación del área de fractura indica que la fractura

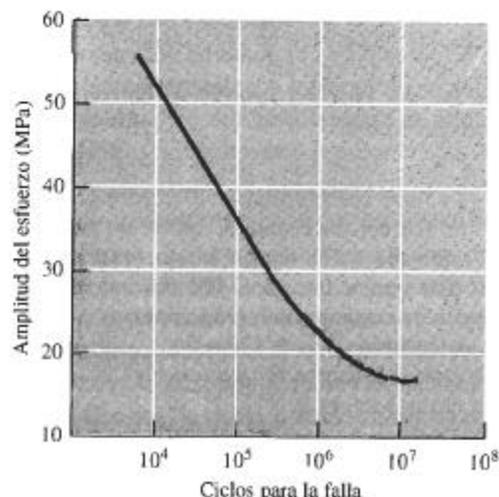
se inició en la superficie de la pieza. Estime el tamaño de la falla que inició la fractura. Suponga que  $f = 1.1$ .

**6-31** Un polímero que contiene defectos internos de 1 mm de longitud falla a un esfuerzo de 25 MPa. Determine la tenacidad a la fractura en deformación plana del polímero. Suponga que  $f = 1$ .

**6-32** Una pieza de material cerámico de una turbina a chorro tiene un esfuerzo de cedencia de 75,000 psi y una tenacidad a la fractura en deformación plana de  $5000 \text{ psi}\sqrt{\text{plg}}$ . A fin de asegurarse de que la pieza no falle, es necesario asegurarse que el esfuerzo aplicado máximo sea sólo la tercera parte del esfuerzo de cedencia. Se utiliza un ensayo no destructivo que detectará cualquier defecto interno mayor de 0.05 plg de largo. Suponiendo que  $f = 1.4$ , ¿tendrá el ensayo no destructivo la sensibilidad requerida? Explique.

**6-33** Una probeta cilíndrica de acero para herramienta, con 6 plg de largo y 0.25 plg de diámetro se mantiene girando como una viga en voladizo y debe diseñarse de tal forma que nunca ocurra la ruptura. Suponiendo que los esfuerzos máximos a la tensión y a la compresión son iguales, determine la carga máxima que se puede aplicar en el extremo de la viga (figura 6-19).

**6-34** Una barra de un polímero acetal de 2 cm de diámetro y 20 cm de longitud (figura 6-27) está cargada en uno de sus extremos y se espera que dure un millón de ciclos de carga con esfuerzos máximos iguales a la tensión y a la compresión. ¿Cuál es la carga máxima permisible que se puede aplicar?



**FIGURA 6-27** Curva amplitud de esfuerzo-número de ciclos por fallo por fatiga para un polímero acetal (para los problemas 6-34, 6-36 y 6-37).

**6-35** Se debe ejercer una carga cíclica de 1500 libras en el extremo de una viga de aluminio de 10 plg de largo (figura 6-19). La barra debe durar por lo menos  $10^6$  ciclos. ¿Cuál es el diámetro mínimo de la barra?

**6-36** Una barra cilíndrica de polímero acetal de 20 cm de largo y 1.5 cm de diámetro se sujeta a una carga vibratoria con una frecuencia de 500 vibraciones por minuto, con una carga de 50 N. ¿Cuántas horas durará la pieza antes de romperse? (figura 6-27).

**6-37** Suponga que se desea producir una pieza del polímero acetal que se muestra en la figura 6-27 para que dure un millón de ciclos bajo condiciones que lo someten a esfuerzos de compresión y tensión iguales. ¿Cuál es la resistencia a la fatiga, o la amplitud máxima del esfuerzo, que se requiere? ¿Cuál es serán los esfuerzos máximo, mínimo y el medio de la pieza durante su uso? ¿Qué efecto tendrá la frecuencia de la aplicación del esfuerzo en sus respuestas? Explique.

**6-38** El acero de alta resistencia de la figura 6-21 se somete a un esfuerzo cíclico de 200 revoluciones por minuto entre 600 MPa y 200 (ambos de tensión). Calcule la rapidez de crecimiento de una grieta desde la superficie cuando llega a una longitud de 0.2 mm tanto en m/ciclos como en m/s. Suponga que  $f = 1.2$ .

**6-39** El acero de alta resistencia de la figura 6-21, que tiene una tenacidad a la fractura crítica de  $80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , se somete a un esfuerzo cíclico que va desde  $-900 \text{ MPa}$  (compresión) hasta  $+900 \text{ MPa}$  (tensión). La pieza debe durar  $10^5$  ciclos antes de que ocurra la falla. Suponga que  $f = 1$ . Calcule

(a) el tamaño de la grieta en la superficie requerida para que ocurra la falla y

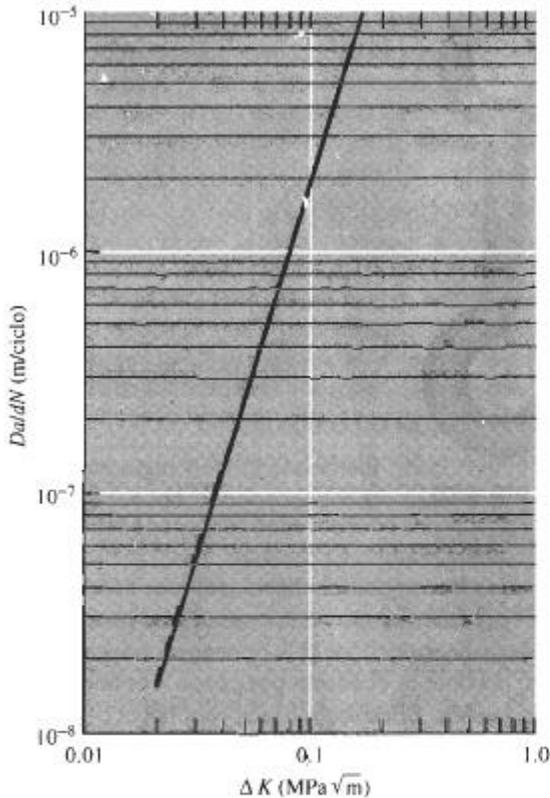
(b) el tamaño más grande inicial de grieta en la superficie que permitirá que esto ocurra.

**6-40** El polímero acrílico a partir del cual se obtuvo la figura 6-28 tiene una tenacidad a la fractura crítica de  $2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Se somete a un esfuerzo cíclico entre  $-10$  y  $+10 \text{ MPa}$ . Calcule la rapidez de crecimiento de una grieta desde la superficie cuando llegue a una longitud de  $5 \times 10^{-6} \text{ m}$  si  $f = 1.3$ .

**6-41** Calcule las constantes  $C$  y  $n$  de la ecuación 6-21 para la velocidad de crecimiento de grietas de un polímero acrílico (figura 6-28).

**6-42** El polímero acrílico a partir del cual se obtuvo la figura 6-28 se somete a un esfuerzo cíclico entre 15 y 0 MPa. Las grietas en la superficie más grandes detectadas inicialmente mediante ensayos no destructivos tienen 0.001 mm de longitud. Si la tenacidad a la frac-

tura crítica del polímero es de  $2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , calcule el número de ciclos requeridos antes de que ocurra la falla. Suponga que  $f = 1.2$ . (Sugerencia: utilice los resultados del problema 6-41.)



**FIGURA 6-28** Rapidez de crecimiento de grietas de un polímero acrílico (para los problemas 6-40, 6-41 y 6-42).

**6-43** Verifique que la integración de  $da/dN = C(\Delta K)^n$  nos dará la ecuación 6-23.

**6-44** La energía de activación para la autodifusión en el cobre es de 49,300 cal/mol. Una muestra de cobre fluye térmicamente a 0.002 plg/plg · h cuando se le aplica un esfuerzo de 15,000 psi a 600°C. Si la rapidez de termofluencia del cobre depende de la autodifusión, determine la rapidez de termofluencia, si la temperatura es de 800°C.

**6-45** Cuando se le aplica un esfuerzo de 20,000 psi a un material calentado a 900°C, la ruptura ocurre en 25,000 h. Si la energía de activación para la ruptura es de 35,000 cal/mol, determine el tiempo de ruptura si la temperatura se reduce hasta 800°C.

**6-46** Los siguientes datos se obtuvieron a partir de un ensayo a la termofluencia para una muestra que tenía una longitud calibrada inicial de 2.0 plg y un diámetro inicial de 0.6 plg. El esfuerzo inicial aplicado al material fue de 10,000 psi. El diámetro de la muestra después de la fractura es de 0.52 plg.

Longitud calibrada (plg)	Tiempo (h)
2.004	0
2.01	100
2.02	200
2.03	400
2.045	1000
2.075	2000
2.135	4000
2.193	6000
2.23	7000
2.30	8000 (fractura)

Determine

- la carga aplicada a la probeta durante el ensayo,
- el tiempo aproximado durante el cual ocurre termofluencia lineal,
- la rapidez de termofluencia en plg/plg · h y en %/h, y
- el esfuerzo real que actúa sobre la muestra al momento de la ruptura.

**6-47** Un acero inoxidable se mantiene a 705°C bajo diferentes cargas. Se obtienen los siguientes datos:

Esfuerzo aplicado (MPa)	Tiempo de ruptura (h)	Rapidez de termofluencia (%/h)
106.9	1200	0.022
128.2	710	0.068
147.5	300	0.201
160.0	110	0.332

Determine los exponentes  $n$  y  $m$  de las ecuaciones 6-25 y 6-26 que describen la dependencia de la rapidez de termofluencia y del tiempo de ruptura sobre el esfuerzo aplicado.

**6-48** Utilizando los datos de la figura 6-25(a) para una aleación de hierro-cromo-níquel, determine la energía de activación  $Q_r$  y la constante  $m$  para la ruptura, en el rango de temperaturas de 980 a 1090°C.

**6-49** Una barra de 1 plg de diámetro de una aleación de hierro-cromo-níquel se somete a una carga de 2500 lb. ¿Cuántos días durará la barra sin romperse a 980°C? [Figura 6-25(a).]

**6-50** Una barra de 5 × 20 mm de aleación hierro-cromo-níquel debe operar a 1040°C durante 10 años sin romperse. ¿Cuál es la carga máxima que se puede aplicar? [figura 6-25(a).]

**6-51** Una aleación de hierro-cromo-níquel debe soportar una carga de 1500 lb a 760°C durante 6 años. Calcule el diámetro mínimo de la barra [figura 6-25(a).]

**6-52** Una barra de 1.2 plg de diámetro de una aleación de hierro-cromo-níquel debe operar durante 5 años bajo una carga de 4000 lb. ¿Cuál es la temperatura máxima de operación? [figura 6-25(a).]

**6-53** Una barra de hierro fundido dúctil de 1 plg × 2 plg debe operar durante 9 años a 650°C. ¿Cuál es la carga máxima que se puede aplicar? [figura 6-25(b)]

**6-54** Una barra de hierro fundido dúctil debe operar con un esfuerzo de 6000 psi por un año. ¿Cuál es la temperatura máxima permisible? [figura 6-25(b)]



### Problemas de diseño

**6-55** Un gancho (figura 6-29) debe diseñarse para levantar contenedores de mineral en una mina, utilizando un material no ferroso (no basado en el hierro). Se utiliza un material no ferroso porque el hierro y el acero pueden causar una chispa y encender gases explosivos dentro de la mina. El gancho debe soportar una carga de 25,000 lb, y debe utilizarse un factor de seguridad del 50%. Se ha determinado que la sección transversal indicada como “?” es el área más crítica; todo el resto del dispositivo ya está bien sobrediseñado. Determine los requerimientos de diseño para este dispositivo y, con base en los datos de propiedades mecánicas de los capítulos 13 y 14, y en los precios de los metales dados en la tabla 13-1, diseñe el gancho y seleccione un material económico para el mismo.

**6-56** Una varilla de soporte para el tren de aterrizaje de un avión privado está sujeta a una carga a la tensión durante el aterrizaje. Se prevén cargas tan altas como 40,000 lb. Dado que esta varilla es crucial y su falla podría llevar a pérdida de vidas, la varilla debe diseñarse con un factor de seguridad del 75% (esto es, diseñada de forma que la varilla sea capaz de soportar cargas cuatro veces mayores de lo esperado). La operación del sistema también produce cargas que pudieran inducir la generación de grietas en la varilla. El

equipo de ensayo no destructivo puede detectar cualquier grieta mayor de 0.02 plg de profundidad. Con base en los materiales que se dan en la tabla 6-6, diseñe la varilla de soporte y su material, y justifique su respuesta.



**FIGURA 6-29** Gancho (para el problema 6-55).

**6-57** Una flecha giratoria ligera para una bomba de un avión nacional aerospacial debe diseñarse para soportar una carga cíclica de 15,000 lb durante su servicio. El esfuerzo máximo es el mismo tanto en la tensión como en la compresión. El esfuerzo límite para fatiga o las resistencias a la fatiga para varios materiales candidatos se muestran a continuación. Diseñe la flecha, incluyendo el material adecuado, y justifique su solución.

Material	Esfuerzo límite para fatiga/ Resistencia a la fatiga (MPa)
Aleación Al-Mn	110
Aleación Al-Mg-Zn	225
Aleación Cu-Be	295
Aleación Mg-Mn	80
Aleación de Be	180
Aleación de Tungsteno	320

**6-58** Una barra de hierro fundido dúctil debe soportar una carga de 40,000 lb en un horno de tratamiento térmico, que se utiliza para la fabricación de hierro fundido maleable. La barra se localiza en un punto continuamente expuesto a 500°C. Diseñe la barra de forma que pueda operar por lo menos durante 10 años sin falla.

# CAPÍTULO 7

## Endurecimiento por deformación y recocido

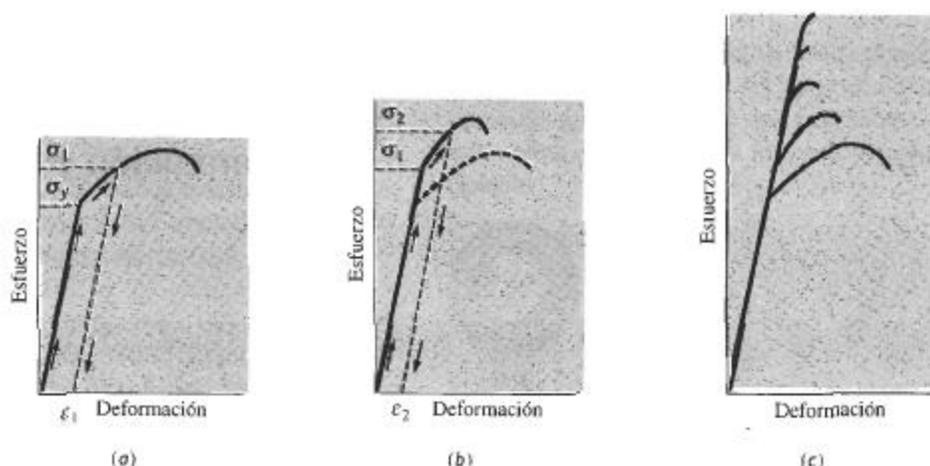
### 7-1 Introducción

En este capítulo se analizarán tres temas principales: *el trabajo en frío*, mediante el cual una aleación simultáneamente se deforma y endurece; *el trabajo en caliente*, mediante el cual una aleación es deformada a altas temperaturas sin endurecerse; y *el recocido*, durante el cual los efectos del endurecimiento causados por el trabajo en frío son eliminados o modificados mediante un tratamiento térmico. El endurecimiento que obtenemos mediante el trabajo en frío, que se genera al incrementar el número de dislocaciones, se conoce como **endurecimiento por deformación** o **endurecimiento por trabajado mecánico**. Al controlar estos procesos de deformación y de tratamiento térmico, se puede darle al material una forma utilizable, y aún así mejorar y controlar sus propiedades.

Los temas que se analizan en este capítulo corresponden particularmente a los metales y las aleaciones. El endurecimiento por deformación, obtenido mediante la multiplicación de dislocaciones, requiere que el material sea dúctil. Materiales frágiles como los cerámicos, por tanto, no responden bien al endurecimiento por deformación. Mostraremos que la deformación de los polímeros termoplásticos producen a veces un efecto de endurecimiento; sin embargo, en los polímeros el mecanismo de endurecimiento por deformación es totalmente distinto.

### 7-2 Relación del trabajo en frío con la curva esfuerzo-deformación

En la figura 7-1(a) se muestra una curva esfuerzo-deformación de un material dúctil. Si se aplica un esfuerzo  $\sigma$ , superior al límite elástico, se causa una deformación permanente, es decir una deformación  $\epsilon_1$ , que se conservará al desaparecer el esfuerzo. Si se toma una muestra del metal que ha sido sujeto al esfuerzo  $\sigma$ , y se vuelve a probar, se obtiene la curva esfuerzo-deformación de la figura 7-1(b). Dicha muestra tendrá un límite elástico en  $\sigma_1$ , una resistencia más alta a la tensión y una ductilidad menor. Al continuar aplicando esfuerzo hasta llegar a  $\sigma_2$ , y en seguida eliminar el esfuerzo y volver a probar el metal, el nuevo límite elástico será  $\sigma_2$ . Cada vez que se aplique un esfuerzo más alto, se incrementarán tanto el límite elástico como la resistencia a la tensión y la ductilidad se reducirá. Si se sigue endureciendo el metal hasta que se igualen el límite elástico, la resistencia a la tensión y la resistencia a la ruptura, y que ya no exista ductilidad [figura 7-1(c)], en este punto, ya no será posible volver a deformar el metal.



**FIGURA 7-1** Desarrollo del endurecimiento por deformación a partir del diagrama esfuerzo-deformación. (a) Se sujeta una muestra a un esfuerzo que excede el límite elástico antes de que desaparezca el esfuerzo. (b) Ahora la muestra tiene un límite elástico y una resistencia a la tensión más altas, pero menor ductilidad. (c) Repitiendo este procedimiento, la resistencia se seguirá incrementando y la ductilidad reduciéndose, hasta que la aleación se vuelva muy frágil.

Aplicando un esfuerzo que sobrepase el límite elástico original del metal, hemos **endurecido por esfuerzo**, es decir, se ha **trabajado en frío** el metal, y al mismo tiempo se deformó haciendo que adquiriera una forma más útil.

**Coefficiente de endurecimiento por deformación** La respuesta del metal al trabajo en frío está dada por su coeficiente de **endurecimiento por deformación**  $n$ , que es la pendiente de la porción de la curva esfuerzo real-deformación real de la figura 7-2 si se usa una escala logarítmica:

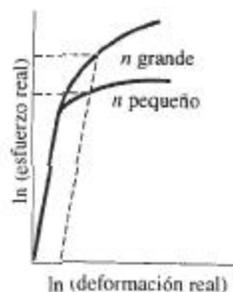
$$\sigma_t = K \varepsilon_t^n$$

o bien

$$\ln \sigma_t = \ln K + n \ln \varepsilon_t$$

(7-1)

La constante  $K$  es igual al esfuerzo cuando  $\varepsilon_t = 1$ .



**FIGURA 7-2** Curvas esfuerzo real-deformación real para metales con coeficientes de endurecimiento por deformación elevados y pequeños. Para una deformación dada se obtienen grados más importantes de endurecimiento en metales con un coeficiente  $n$  mayor.

En el caso de metales HC el coeficiente de endurecimiento por deformación es relativamente bajo, pero es más alto para los CC y, particularmente, para los CCC (tabla 7-1). Aquellos me-

tales con un bajo coeficiente de endurecimiento por deformación responden mal al trabajo en frío.

**TABLA 7-1** Coeficientes de endurecimiento por deformación de metales y aleaciones típicas

Metal	Estructura cristalina	$n$	$K$ (psi)
Titanio	HC	0.05	175,000
Aleación de acero recocida	CC	0.15	93,000
Aceero de mediano carbono templado y revenido	CC	0.10	228,000
Molibdeno	CC	0.13	105,000
Cobre	CCC	0.54	46,000
Cu-30% Zn	CCC	0.50	130,000
Aceero inoxidable austenítico	CCC	0.52	220,000

Adaptado de G. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, 1961 y de otras fuentes.

### 7-3 Mecanismos de endurecimiento por deformación

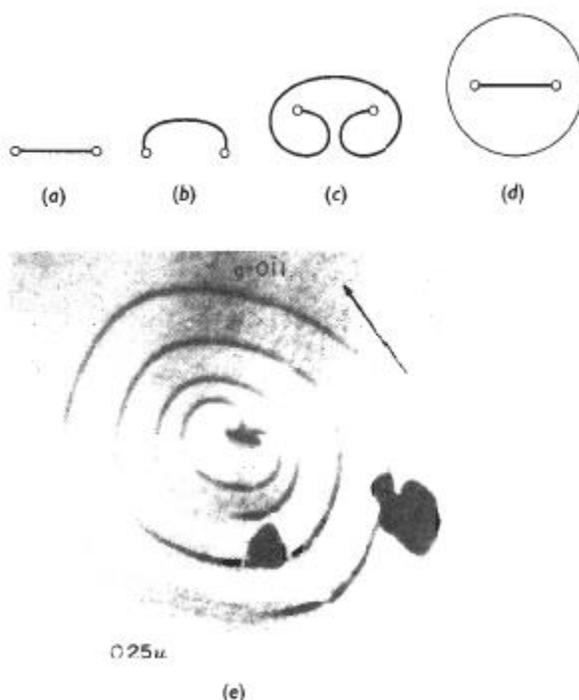
Se obtiene el endurecimiento por deformación de un metal incrementando el número de dislocaciones. Antes de la deformación, la densidad de dislocaciones es aproximadamente  $10^6$  cm de líneas de dislocación por centímetro cúbico, cantidad relativamente pequeña de dislocaciones.

Cuando se aplica un esfuerzo superior al límite elástico, las dislocaciones empiezan a deslizarse. Finalmente, una dislocación moviéndose sobre su plano de deslizamiento encontrará un obstáculo que sujeta los extremos de la línea de dislocación. Si se continúa aplicando esfuerzo, la dislocación tratará de moverse arqueándose por el centro. La dislocación puede moverse tanto que produzca un lazo (figura 7-3). Cuando éste finalmente se toca a sí mismo, se ha creado una dislocación nueva. La original sigue sujeta y podrá crear lazos de dislocación adicionales. Este mecanismo de generación de dislocaciones se conoce como **fuelle de Frank-Read**; en la figura 7-3(c) se muestra una microfotografía electrónica de una fuente Frank-Read.

El número de dislocaciones puede incrementarse hasta cerca de  $10^{12}$  cm líneas de dislocación por centímetro cúbico de metal. Sabemos que cuantas más dislocaciones existan, es más probable que interfieran unas con otras y que el metal tenga mayor resistencia.

Los materiales cerámicos pueden contener dislocaciones e incluso pueden endurecerse un poco por deformación. Sin embargo, los cerámicos normalmente son tan frágiles que no es posible deformarlos y endurecerlos significativamente a bajas temperaturas; la deformación puede ocurrir a temperaturas elevadas, aunque causada por deslizamiento de granos y otros fenómenos. De igual manera, materiales con enlaces covalentes, como el silicio, son demasiado frágiles para endurecerse apreciablemente.

Los polímeros termoplásticos se endurecerán al ser deformados. Esto *no es*, sin embargo, endurecimiento por deformación sino más bien involucra la alineación y posiblemente la cristalización de las largas cadenas moleculares. Cuando a los polímeros termoplásticos como el polietileno se les aplica un esfuerzo mayor al límite elástico, los enlaces van der Waals entre cadenas se rompen. Las cadenas se enderezan y se alinean en dirección del esfuerzo aplicado (figura 7-4). La resistencia del polímero, particularmente en dirección del esfuerzo aplicado, aumenta como resultado de esta alineación.



**FIGURA 7-3** La fuente Frank-Read puede generar dislocaciones. (a) Una dislocación está sujeta en sus extremos por defectos en la red. (b) Conforme se sigue moviendo la dislocación, se arquea y finalmente se tuerce sobre sí misma. (c) Finalmente se forma un lazo de dislocación (d) creándose una dislocación nueva. (e) Microfotografía electrónica de una fuente Frank-Read ( $\times 30,000$ ). (De J. Brittain, "Climb Sources in Beta Prime-NiAl", Metallurgical Transactions, Vol. 6A, abril 1975.)

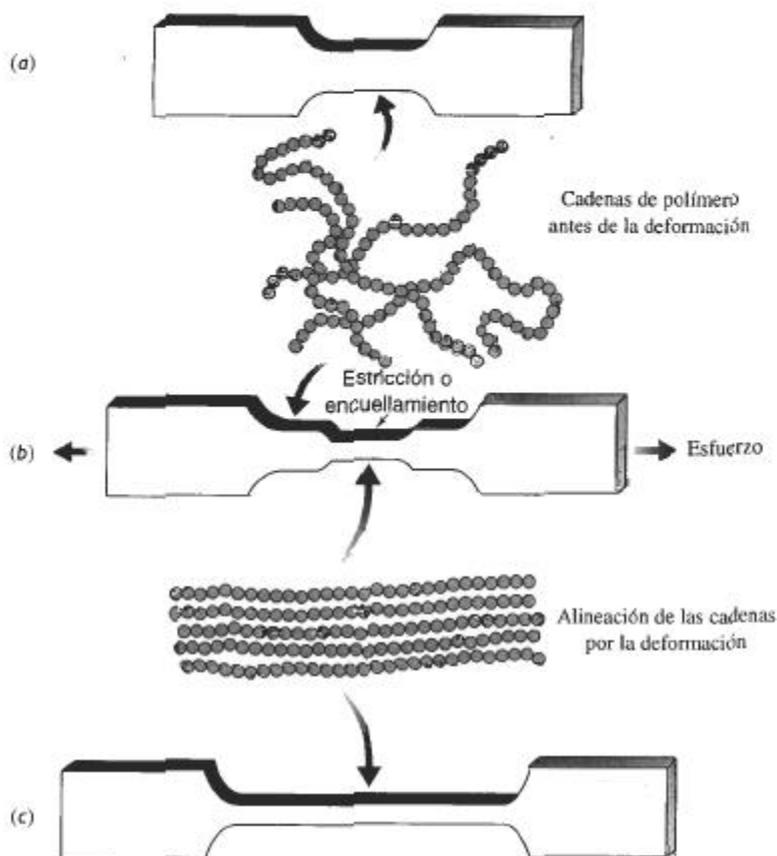
## 7-4 Propiedades en función del porcentaje de trabajo en frío

Se utilizan muchas técnicas para, de manera simultánea, conformar y endurecer un material por trabajo en frío (figura 7-5). Para producir placa, hoja o lámina de metal se utiliza el *laminado*. El *forjado* deforma el metal al introducirlo en moldes, a fin de producir formas relativamente complejas, como cigüeñales o bielas de automóvil. En el **trefilado**, se jala un metal o un polímero a través de un molde para producir un alambre. En la **extrusión**, se empuja un material a través de un molde para formar productos de sección transversal uniforme, incluyendo varillas, tubos o biseles de aluminio para puertas o ventanas. El estampado profundo o embutido se utiliza para formar el cuerpo de latas de aluminio para bebidas. El *estirado* y el *doblado* se utilizan para darle forma a material en láminas. Al controlar la deformación, se controla el endurecimiento por deformación. Normalmente se mide la deformación definiendo el *porcentaje de trabajo en frío*:

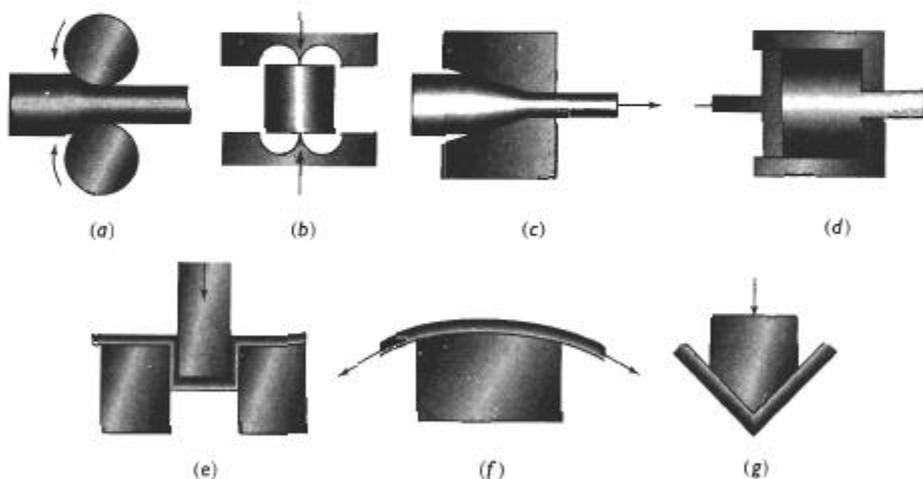
$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100, \quad (7-2)$$

donde  $A_0$  es el área transversal original del metal y  $A_f$  es el área transversal final después de la deformación.

El efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre puro comercial se presentan en la figura 7-6. Al incrementar el trabajo en frío, tanto el límite elástico como la resistencia a la tensión aumentan; la ductilidad, sin embargo, se reduce acercándose a cero. Si se



**FIGURA 7-4** En una barra a la tensión de polímero termoplástico sin deformar (a), las cadenas del polímero están orientadas al azar. Al aplicar un esfuerzo (b), se desarrolla un encuellamiento conforme las cadenas se van alineando localmente. La estricción continúa creciendo, hasta que se hayan alineado las cadenas de toda la longitud calibrada (c). La resistencia del polímero ha aumentado.



**FIGURA 7-5** Esquemas de las técnicas de procesamiento por deformación. (a) Rolado o laminado, (b) forjado, (c) trefilado, (d) extrusión, (e) embutido, (f) estirado, (g) doblado.

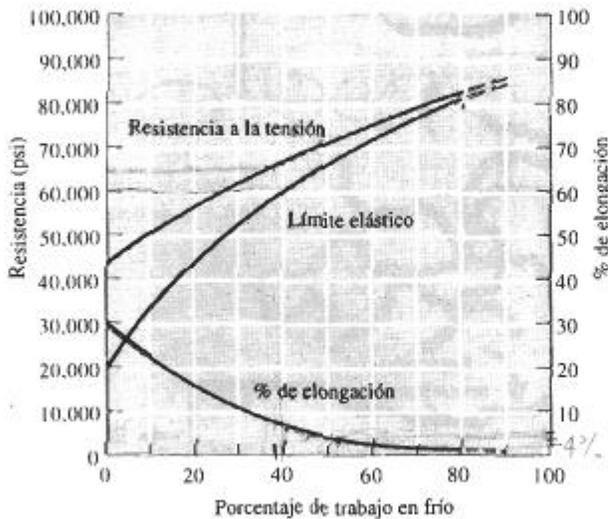


FIGURA 7-6 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

intenta más trabajo en frío, el metal se romperá. Por lo tanto, existe un máximo de trabajo en frío, es decir de deformación que puede aplicarse a un metal.

### EJEMPLO 7-1

Una placa de cobre de 1 cm de espesor se reduce en frío a 0.50 cm y posteriormente se reduce aún más, hasta 0.16 cm. Determine el porcentaje total de trabajo en frío y la resistencia a la tensión de la placa de 0.16 cm (figura 7-7).

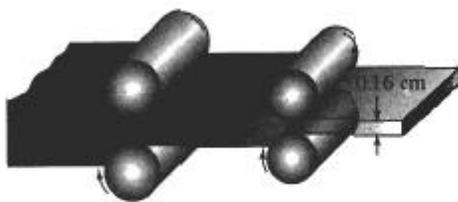


FIGURA 7-7 Diagrama que muestra el laminado de una placa de 1 cm hasta una de 0.16 cm (ejemplo 7-1).

### SOLUCIÓN

Podría pensarse en determinar el monto del trabajo en frío llevado a cabo en cada uno de los pasos, esto es

$$\% \text{ CW} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 = \frac{1 - 0.50}{1} \times 100 = 50\%$$

$$\% \text{ CW} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 = \frac{0.50 - 0.16}{0.50} \times 100 = 68\%$$

Observe: dado que en laminación el ancho de la placa no cambia, el trabajo en frío se puede expresar como el porcentaje de reducción en espesor  $t$ . Entonces, podría considerarse combi-

nar ambos porcentajes de trabajo en frío (50% + 68% = 118%) para obtener el trabajo en frío total. *Todo esto no sería correcto.*

Nuestra definición de trabajo en frío es el cambio porcentual entre las áreas transversales original y final; no importa cuántos pasos intermedios estén implicados. Por lo tanto, el trabajo en frío total es, de hecho

$$\% CW = \frac{t_0 - t_f}{t_0} \times 100 = \frac{1 - 0.16}{1} \times 100 = 84\%$$

y, de la figura 7-6, la resistencia a la tensión es de aproximadamente 82,000 psi.

Si se conoce el monto del trabajo en frío durante el procesamiento se podrán predecir las propiedades de un metal o de una aleación. Entonces será posible decidir si el componente tiene la resistencia adecuada en sitios críticos.

Cuando se desea seleccionar el material para un componente con ciertas propiedades mecánicas mínimas, se podrá diseñar el proceso de deformación. Primero se determina el porcentaje del trabajo en frío necesario y, entonces, a partir de la ecuación del trabajo en frío y utilizando las dimensiones finales deseadas, se determinarán las dimensiones originales del metal.

### EJEMPLO 7-2

### Diseño de un proceso de trabajo en frío

Diseñe un proceso de manufactura para producir una placa de cobre de 0.1 cm de espesor, que tenga una resistencia a la tensión de por lo menos 65,000 psi, un límite elástico de 60,000 psi y 5% de elongación.

### SOLUCIÓN

Según la figura 7-6, para producir una resistencia a la tensión de 65,000 psi se necesitan por lo menos un 35% de trabajo en frío, y para producir un límite elástico de 60,000 psi se necesitan 40% de trabajo en frío, pero para cumplir con el requisito del 5% de elongación se requiere menos del 45% de trabajo en frío. Por tanto, cualquier trabajo en frío entre 40 y 45% dará las propiedades mecánicas requeridas.

Para producir la placa, sería apropiado un proceso de *laminado en frío*. El espesor original de la placa de cobre antes del laminado puede calcularse a partir de la ecuación 7-2, suponiendo que no cambia el ancho de la placa. Dado que existe un rango permisible de trabajo en frío, entre el 40 y el 45%, también aparece un rango de espesores iniciales de la placa:

$$\% CW_{\min} = 40 = \frac{t_{\min} - 0.1}{t_{\min}} \times 100 \quad t_{\min} = 0.167 \text{ cm}$$

$$\% CW_{\max} = 45 = \frac{t_{\max} - 0.1}{t_{\max}} \times 100 \quad t_{\max} = 0.182 \text{ cm}$$

Para producir una placa de cobre de 0.1 cm, se empieza con una de 0.167 a 0.182 cm en su estado más blando posible: a continuación se lamina la placa de un 40 a un 45%, hasta conseguir un espesor de 0.1 cm.

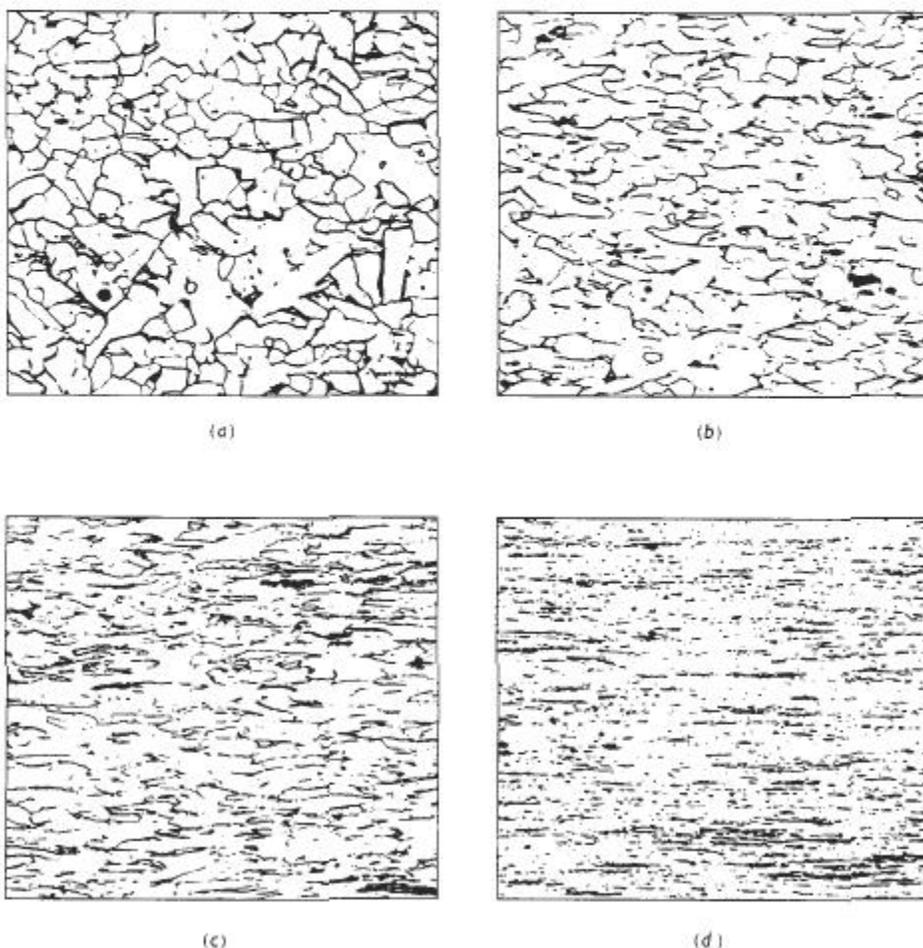
## 7-5 Microestructura y esfuerzos residuales

Durante la deformación, al alargarse los granos dentro del metal se forma una microestructura fibrosa (figura 7-8).

**Comportamiento anisotrópico** A lo largo del proceso, los granos giran y al mismo tiempo se alargan, haciendo que ciertas direcciones y planos cristalográficos queden alineados. En consecuencia, se desarrollan orientaciones, es decir, texturas preferenciales, causando un comportamiento anisotrópico.

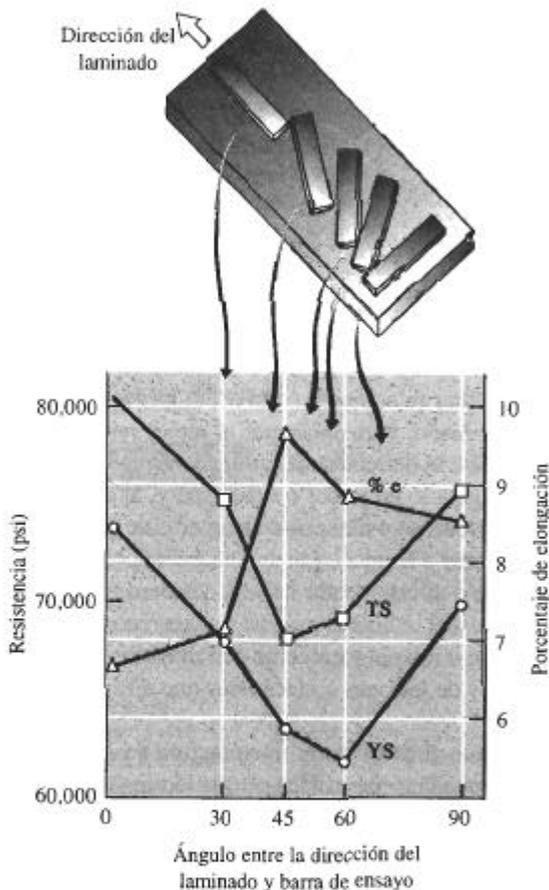
En procesos como el trefilado, se produce una **textura fibrosa**. En los metales CC, las direcciones  $\langle 110 \rangle$  se alinean con el eje del alambre. En los metales CCC, son las direcciones  $\langle 111 \rangle$  y  $\langle 100 \rangle$  las que se alinean. Esto da la máxima resistencia a lo largo del eje del alambre, justo lo que se desea. Una situación similar ocurre al estirar por trefilado los materiales polímeros; durante el trefilado, las cadenas de polímeros se alinean una al lado de la otra a lo largo de la fibra. Como en el caso de los metales, la mayor resistencia aparece a lo largo del eje de las fibras.

En procesos como el laminado, se producen tanto una dirección como un plano preferencial, lo que da una **textura foliada o laminar**. Las propiedades de una hoja o placa laminada dependerán de la dirección en la cual se mida dicha propiedad. La figura 7-9 resume las propiedades a la tensión de una aleación trabajada en frío de aluminio y litio, utilizada para aplicacio-



**FIGURA 7-8** Estructura granular fibrosa de un acero de bajo carbono, producida por trabajo en frío: (a) 10% de trabajo en frío, (b) 30% de trabajo en frío, (c) 60% de trabajo en frío y (d) 90% de trabajo en frío ( $\times 250$ ). De "Metals Handbook", Vol. 9, 9a edición, American Society for Metals, 1985.

nes aerospaciales. En esta aleación, la resistencia máxima es paralela a la dirección del laminado, en tanto que su ductilidad es máxima a un ángulo de  $45^\circ$  en relación con la dirección del laminado.



**FIGURA 7-9** Comportamiento anisotrópico de un material laminado de aluminio-litio, utilizado en aplicaciones aerospaciales. El esquema relaciona la posición de las barras de tensión con las propiedades mecánicas obtenidas.

### EJEMPLO 7-3 Diseño de un proceso de estampado

Un método para producir ventiladores de enfriamiento de motores de automóviles y camiones es el estampado de las aspas a partir de hoja de acero laminada en frío y, a continuación, el fijado de las aspas a una "araña" que las sujeta en posición correcta. Varias aspas de ventilador, todas producidas al mismo tiempo, han fallado debido a la iniciación y propagación de una grieta por fatiga, transversal al eje del aspa (figura 7-10). Todas las demás aspas funcionan satisfactoriamente. Dé una explicación para las fallas y rediseñe el proceso de manufactura, a fin de evitarlas.

### SOLUCIÓN

Pueden existir varias explicaciones para dichas fallas: por ejemplo, pudiera haberse seleccionado un acero equivocado; los dados para estampar las aspas a partir de la lámina pudieran estar

desgastados; o la tolerancia entre secciones de dados pudiera ser incorrecta, produciendo defectos iniciadores de fallas por fatiga.

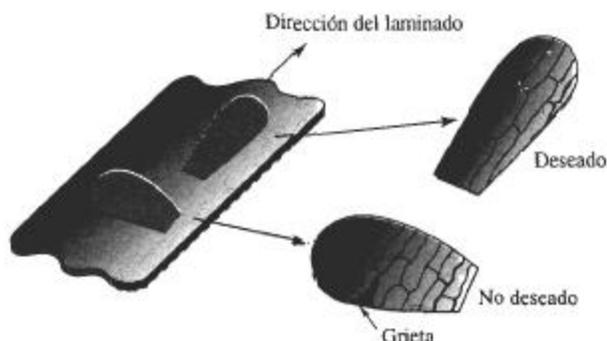


FIGURA 7-10 Orientación de las muestras (para el ejemplo 7-3).

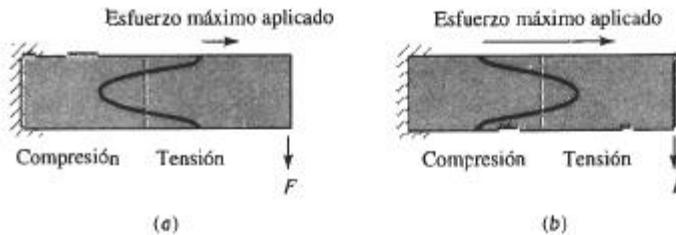
Las fallas también pudieran estar relacionadas con el comportamiento anisotrópico de la lámina de acero causada por el laminado. Para conseguir el mejor rendimiento del aspa, el eje de la misma deberá estar alineado con la dirección de laminado de la hoja de acero. Este procedimiento produce una resistencia alta a lo largo del eje del aspa y, al asegurarse de que los granos estén alineados con dicho eje, se reduce el número de fronteras de grano a lo largo del borde de ataque del aspa, que pudieran ayudar a la iniciación de una grieta por fatiga. Suponga que el examen del aspa le indica que durante el estampado la hoja de acero estaba alineada con una desviación de  $90^\circ$  sobre su posición usual. Ahora el aspa tiene baja resistencia en su dirección crítica y, además, las grietas por fatiga se iniciarán y crecerán con mayor facilidad. Este error de manufactura ha sido la causa de fallas y de lesiones a mecánicos que ejecutan tareas de mantenimiento en automóviles.

Quizá debería recomendar que el proceso de manufactura se rediseñe, para asegurarse de que las aspas no puedan ser estampadas o prensadas en una lámina mal orientada. Quizá guías o dispositivos de bloqueo especiales, colocados sobre el dado, asegurarán que esté correctamente alineado con la lámina.

**Esfuerzos residuales** Los esfuerzos residuales se desarrollan durante la deformación. Una pequeña parte del esfuerzo aplicado —quizás aproximadamente el 10%— queda almacenada en el interior de la estructura en forma de una intrincada red de dislocaciones. Los esfuerzos residuales incrementan la energía total de la estructura.

Los esfuerzos residuales no están uniformemente distribuidos en todo el metal deformado. Por ejemplo, puede haber altos esfuerzos residuales a la compresión en la superficie de una placa laminada, mientras en su centro quedan almacenados esfuerzos a la tensión elevados. Si se maquina una pequeña porción de metal superficial de una pieza trabajada en frío, se eliminará metal que sólo contiene esfuerzos residuales a la compresión. Para que el equilibrio se restablezca, la placa tendrá que distorsionarse.

Los esfuerzos residuales también afectan la capacidad de la pieza para soportar una carga (figura 7-11). Si se aplica un esfuerzo a la tensión a un material que ya tenga esfuerzos residuales a la tensión, el esfuerzo total actuando sobre la pieza es la suma de los esfuerzos aplicado y residual. Pero si están almacenados esfuerzos a la compresión en la superficie de una pieza metálica, un esfuerzo a la tensión aplicado primero deberá equilibrar los esfuerzos residuales a la compresión. Ahora la pieza pudiera ser capaz de soportar una carga mayor a la normal.



**FIGURA 7-11** Los esfuerzos residuales de compresión pueden ser perjudiciales o benéficos. En (a), una fuerza de flexión aplica un esfuerzo a la tensión a la parte superior de la viga. Dado que ya existen esfuerzos residuales a la tensión en la parte superior, las características de soporte de carga serán malas. En (b), la parte superior contiene esfuerzos residuales a la compresión. Ahora las características de soporte de carga son muy buenas.

A veces, componentes sujetos a falla por fatiga pueden ser endurecidos mediante el **granallado**. Al bombardear la superficie con perdigones de acero lanzados a alta velocidad, se introducen en la superficie esfuerzos residuales de compresión, que incrementan la resistencia de ésta a las fallas por fatiga.

#### EJEMPLO 7-4 Diseño de una flecha resistente a la fatiga

Una empresa ha producido varios millones de flechas con una resistencia a la fatiga de 20,000 psi. Estas flechas, en su rotación, están sujetas a elevadas cargas de flexión. Los ingenieros de ventas informan que las primeras flechas en servicio fallaron por fatiga en un lapso corto. Diseñe un proceso mediante el cual las flechas restantes puedan ser “recuperadas” al mejorar sus propiedades a la fatiga.

#### SOLUCIÓN

Las fallas a la fatiga típicamente se inician en la superficie de una pieza en rotación, por lo que, al incrementar la resistencia de la superficie aumentará la duración a la fatiga de la flecha. Para conseguir lo anterior pueden utilizarse una diversidad de métodos.

Si la flecha está fabricada de acero, se podría carburizar su superficie. En la carburización, se difunde carbón dentro de la superficie de la flecha. Después de un tratamiento térmico apropiado, el porcentaje más alto de carbono en la superficie incrementa la resistencia de la superficie y, quizá todavía más importante, genera en esa área esfuerzos residuales a la compresión.

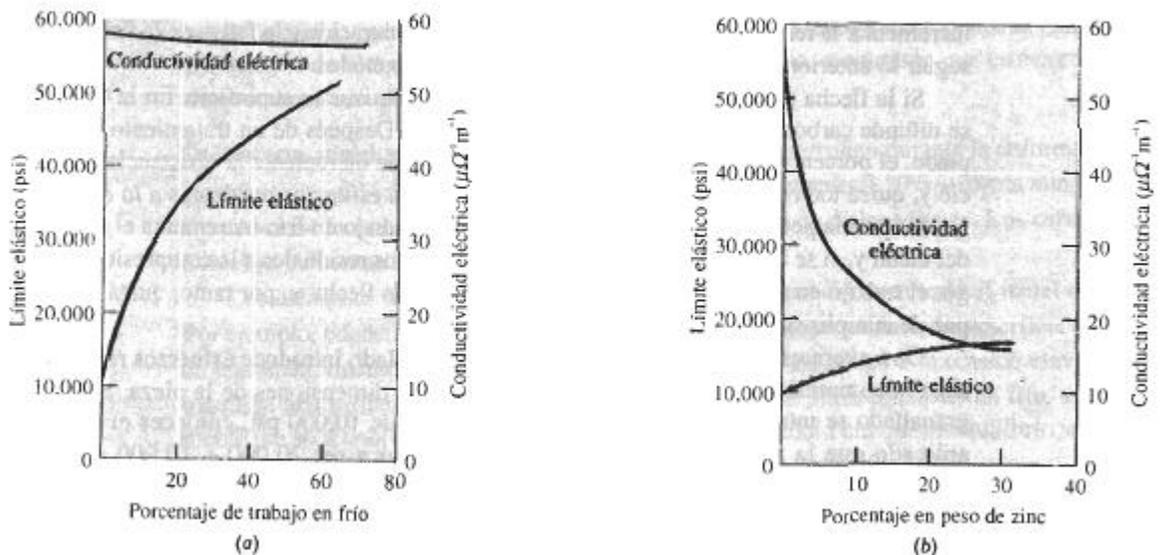
Se podría pensar en trabajar la flecha en frío; el trabajo en frío incrementa el límite elástico del metal y, si se hace correctamente, introduce esfuerzos residuales a la compresión. Sin embargo, el trabajo en frío también reducirá el diámetro de la flecha y, por tanto, quizá ya no sea capaz de cumplir su cometido.

Otra alternativa sería granallar la flecha. El granallado introduce esfuerzos residuales locales a la compresión en la superficie, sin modificar las dimensiones de la pieza. Si mediante el granallado se introdujeran esfuerzos a la compresión de 10,000 psi, entonces el esfuerzo total aplicado que la flecha podría soportar pudiera llegar a ser  $20,000 + 10,000 = 30,000$  psi. Este proceso, que también resulta económico, pudiera ser suficiente para la “recuperación” de las flechas restantes.

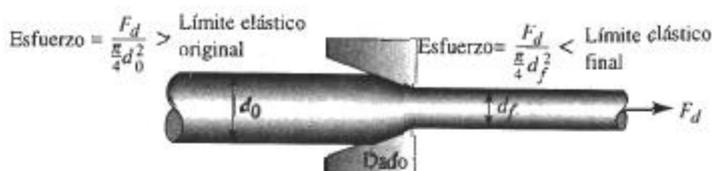
## 7-6 Características del trabajo en frío

Existen ventajas y limitaciones en el endurecimiento de un metal mediante el trabajo en frío o endurecimiento por deformación:

1. Simultáneamente se puede endurecer el metal y producir la forma final deseada.
2. Mediante el proceso de trabajo en frío es posible obtener tolerancias dimensionales y terminados superficiales excelentes.
3. El proceso de trabajo en frío es un método económico para producir grandes cantidades de pequeñas piezas, ya que no requiere de fuerzas elevadas ni de equipo de conformado costoso.
4. Algunos metales, como el magnesio HC tienen un número limitado de sistemas de deslizamiento y a temperatura ambiente son más bien frágiles; por lo que sólo es posible realizar un grado reducido de trabajo en frío.
5. Durante el trabajo en frío la ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión se deterioran. Dado que el trabajo en frío reduce la conductividad eléctrica en menor grado que otros procesos de endurecimiento, como introducir elementos aleantes (figura 7-2), el trabajo en frío es una forma satisfactoria para endurecer materiales conductores como alambres de cobre utilizados para transmitir energía eléctrica.
6. Los esfuerzos residuales y el comportamiento anisotrópico adecuadamente controlados pudieran ser benéficos.
7. Algunas técnicas de procesamiento por deformación sólo pueden efectuarse si se aplica trabajo en frío. Por ejemplo, el trefilado de alambre requiere que se tire de una varilla a través de un dado, para producir una sección transversal menor (figura 7-13). Para una fuerza dada de trefilado  $F_s$ , un esfuerzo diferente es producido en el alambre original y en el final. El esfuerzo en el alambre original deberá sobrepasar el límite elástico del metal para poder causar su deformación. El esfuerzo en el alambre final debe quedar por debajo de su límite elástico para evitar la ruptura. Esto se consigue sólo si la deformación endurece el alambre al trefilar.



**FIGURA 7-12** Comparación del endurecimiento del cobre mediante (a) trabajo en frío y (b) aleación con zinc. Observe que el trabajo en frío produce un endurecimiento mayor, afectando, sin embargo, poco la conductividad eléctrica.



**FIGURA 7-13** Proceso de trefilado. La fuerza  $F_d$  actúa sobre los diámetros tanto original como final. Por lo que el esfuerzo producido sobre el alambre final es mayor que el producido sobre el original. Si el alambre no se endureciera por esfuerzo durante el trefilado, el alambre final se rompería antes de que se hubiera podido hacer pasar el alambre original a través del dado.

### EJEMPLO 7-5 Diseño de un proceso de trefilado

Diseñe un proceso para producir alambre de cobre de 0.20 pulgadas de diámetro.

#### SOLUCIÓN

El trefilado es la técnica obvia de manufactura para esta aplicación. Para producir un alambre de cobre lo más eficiente posible, se efectúa la mayor reducción de diámetro que se pueda. El diseño debe asegurar que el alambre se endurezca por esfuerzo lo suficiente durante el trefilado, para evitar que el alambre estirado se rompa.

Como ejemplo de cálculo, supóngase que el diámetro inicial del alambre de cobre es de 0.40 pulgadas y que está en el estado más blando posible. El trabajo en frío es:

$$\begin{aligned} \% \text{ CW} &= \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 = \frac{(\pi/4)d_0^2 - (\pi/4)d_f^2}{(\pi/4)d_0^2} \times 100 \\ &= \frac{(0.40)^2 - (0.20)^2}{(0.40)^2} \times 100 = 75\% \end{aligned}$$

De la figura 7-6, el límite elástico inicial, con 0% de trabajo en frío es de 22,000 psi. El límite elástico final, con 75% de trabajo en frío es de aproximadamente 77,500 psi (con muy poca ductilidad). La fuerza de tracción requerida para deformar el alambre inicial es:

$$F = \sigma_y A_0 = (22,000)(\pi/4)(0.40)^2 = 2765 \text{ lb}$$

El esfuerzo que actúa sobre el alambre después de haber pasado por el dado es:

$$\sigma = \frac{F_d}{A_f} = \frac{2765}{(\pi/4)(0.20)^2} = 88,010 \text{ psi}$$

El esfuerzo aplicado de 88,010 psi es mayor que el límite elástico de 77,500 psi del alambre estirado. Por tanto, el alambre se romperá.

Se puede realizar el mismo conjunto de cálculos para otros diámetros iniciales, con los resultados que aparecen en la tabla 7-2 y en la figura 7-14.

La gráfica muestra que el esfuerzo de trefilado sobrepasa el límite elástico del alambre estirado, a partir del momento en que el diámetro original es de aproximadamente 0.37 pulgadas. Para producir el alambre con el máximo de eficiencia posible, el diámetro original deberá estar justo por debajo de 0.37 pulgadas.

TABLA 7-2

$d_0$	% de trabajo en frío	Límite elástico del alambre trefilado	Fuerza de tracción	Esfuerzo sobre el alambre trefilado
0.25 plg	36%	58,000 psi	1080 lb	34,380 psi
0.30 plg	56%	68,000 psi	1555 lb	49,500 psi
0.35 plg	67%	74,000 psi	2117 lb	67,390 psi
0.40 plg	75%	77,500 psi	2765 lb	88,010 psi

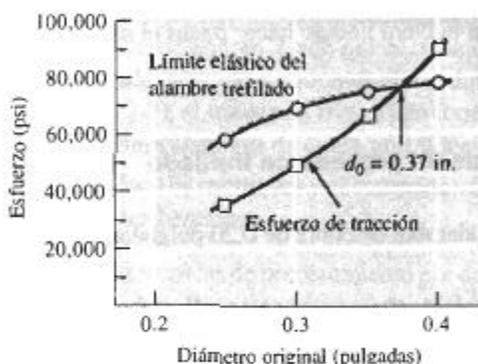


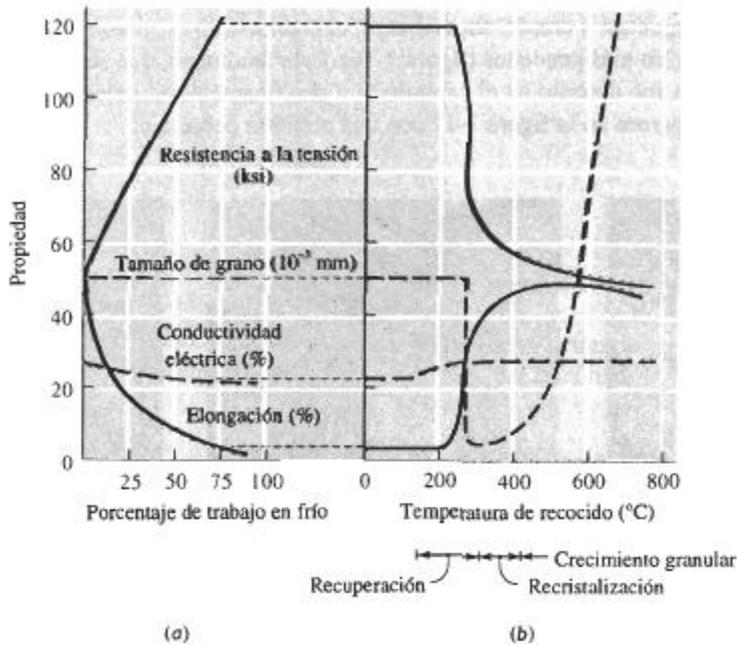
FIGURA 7-14 Límite elástico y esfuerzo de tracción del alambre (para el ejemplo 7-5).

## 7-7 Las tres etapas del recocido

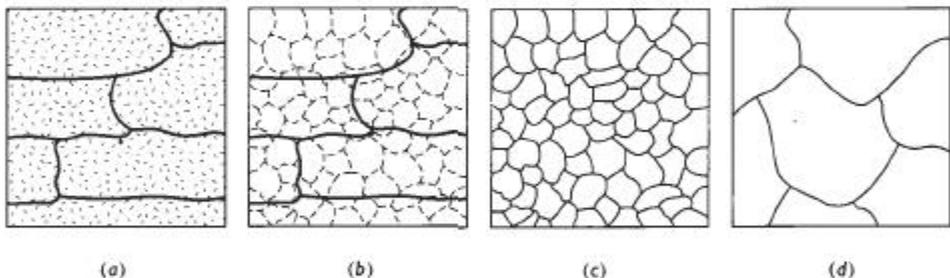
El **recocido** es un tratamiento térmico diseñado para eliminar los efectos del trabajo en frío. Puede utilizarse para eliminar totalmente el endurecimiento por deformación conseguido durante el trabajo en frío; el componente final será blando y dúctil, pero conservando el terminado superficial y una precisión dimensional satisfactorios. O bien, después del recocido, podría seguir aplicándose trabajo adicional en frío, ya que la ductilidad ha sido restablecida. Combinando ciclos repetidos de trabajo en frío y de recocido, se pueden alcanzar grandes deformaciones totales. Finalmente, el recocido a baja temperatura puede utilizarse para eliminar esfuerzos residuales producidos durante el trabajo en frío, sin afectar las propiedades mecánicas de la pieza terminada. Existen tres etapas en el proceso de recocido; los efectos sobre las propiedades del latón aparecen en la figura 7-15.

**Recuperación** La microestructura original trabajada en frío está compuesta por granos deformados con gran número de dislocaciones entrelazadas. Cuando al principio se calienta el metal, la energía térmica adicional permite que las dislocaciones se muevan y formen los bordes de una **estructura subgranular poligonizada** (figura 7-16). Sin embargo, la densidad de las dislocaciones se mantiene virtualmente sin modificación. Este tratamiento a baja temperatura se llama **recuperación**.

Como durante la recuperación no se ha reducido el número de dislocaciones, las propiedades mecánicas del metal quedan relativamente igual; sin embargo, al reordenar las dislocaciones se han reducido o incluso se han eliminado los esfuerzos residuales; esta recuperación a menudo se conoce como **recocido para eliminación de esfuerzos**. Además, la recuperación restablece una alta conductividad eléctrica al metal, permitiendo producir alambre resistente de cobre o de aluminio para transmisión de energía eléctrica con una conductividad elevada. Finalmente, la recuperación a menudo mejora la resistencia del material a la corrosión.



**FIGURA 7-15** (a) Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades de una aleación de Cu-35% Zn. (b) Efecto de la temperatura de recocido sobre las propiedades de Cu-35% Zn trabajado en frío al 75%.

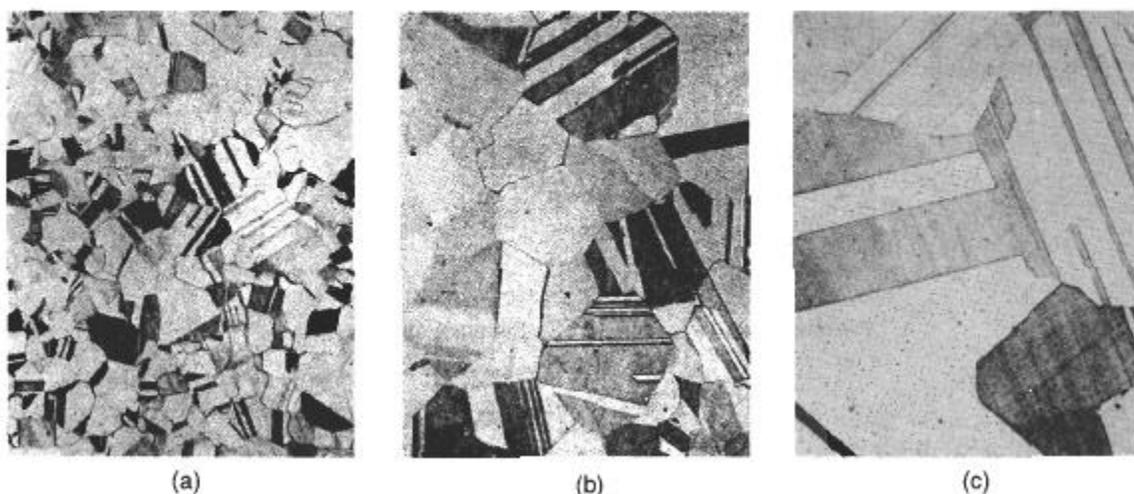


**FIGURA 7-16** Efecto de la temperatura de recocido sobre la microestructura de metales trabajados en frío: (a) trabajado en frío, (b) después de la recuperación, (c) después de la recristalización y (d) después del crecimiento de grano.

**Recristalización** La **recristalización** ocurre debido a la nucleación y crecimiento de nuevos granos que contienen pocas dislocaciones. Cuando se calienta el metal por encima de la temperatura de recristalización, una rápida recuperación elimina los esfuerzos residuales, produciendo una estructura de dislocación poligonizada. En este momento ocurre la nucleación de granos pequeños en los bordes de celda de la estructura poligonizada, eliminando la mayoría de las dislocaciones (figura 7-16). Dado que se ha reducido de manera importante el número de dislocaciones, el metal recristalizado tiene baja resistencia, pero una elevada ductilidad.

**Crecimiento granular** A temperaturas de recocido aún mayores, tanto la recuperación como la recristalización ocurren con rapidez, produciendo una estructura granular recristalizada fina.

Los granos empiezan a crecer, sin embargo, el crecimiento de ciertos granos es favorecido, lo cual elimina a los más pequeños (figura 7-16). Este fenómeno, que se conoce como crecimiento de grano ya fue descrito en el capítulo 5, y prácticamente es indeseable en todos los casos. Un ejemplo aparece en la figura 7-17 con una aleación cobre-zinc.



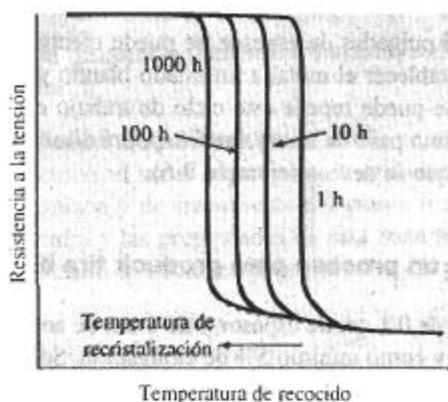
**FIGURA 7-17** Microfotografías que muestran el efecto de la temperatura de recocido sobre el tamaño de grano en el latón. También se pueden observar bandas de deslizamiento en estas estructuras. (a) Recocido a 400°C, (b) recocido a 650°C y (c) recocido a 800°C ( $\times 75$ ). (De R. Brick y A. Phillips, *The Structure and Properties of Alloys*, McGraw-Hill, 1949.)

## 7-8 Control del recocido

Para diseñar un tratamiento térmico apropiado de recocido, es necesario conocer la temperatura de recrystalización y el tamaño de los granos recrystalizados.

**Temperatura de recrystalización** La temperatura de recrystalización se afecta por diversas variables del proceso:

1. La temperatura de recrystalización disminuye al incrementar la cantidad de trabajo en frío. Mayores cantidades de trabajo en frío hacen al metal menos estable y propician la nucleación de los granos recrystalizados. Existe una cantidad mínima de trabajo en frío, aproximadamente el 30 a 40%, por debajo de la cual no ocurrirá la recrystalización.
2. Un tamaño originalmente pequeño de grano trabajado en frío reduce la temperatura de recrystalización al tener más sitios, que eran antes bordes de granos, en los cuales pueden nuclearse los nuevos granos.
3. Los metales puros se recrystalizan a temperaturas menores que las aleaciones.
4. Al incrementar el tiempo de recocido se reduce la temperatura de recrystalización (figura 7-18) ya que hay mayor tiempo disponible para la nucleación y el crecimiento de los nuevos granos recrystalizados.
5. Las aleaciones con punto de fusión alto tienen una temperatura de recrystalización mayor. Dado que la recrystalización es un proceso controlado por la difusión, la temperatura de recrystalización es aproximadamente proporcional a  $0.4T_m$  Kelvin. En la tabla 7-3 aparecen temperaturas típicas de recrystalización para algunos metales seleccionados.



**FIGURA 7-18** Los tiempos de recocido más largos reducen la temperatura de recristalización.

**TABLA 7-3** Temperaturas típicas de recristalización para metales seleccionados

Metal	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de recristalización (°C)
Sn	232	<Temperatura ambiente
Pb	327	<Temperatura ambiente
Zn	420	<Temperatura ambiente
Al	660	150
Mg	650	200
Ag	962	200
Cu	1085	200
Fe	1538	450
Ni	1453	600
Mo	2610	900
W	3410	1200

Adaptado de R. Brick, A. Pense y R. Gordon, *Structure and Properties of Engineering Materials*, McGraw-Hill, 1977.

**Tamaño del grano recristalizado** Varios factores también influyen sobre el tamaño de los granos recristalizados. La reducción de la temperatura de recocido, el tiempo utilizado para calentar hasta la temperatura de recocido, o el tiempo de recocido reducen el tamaño del grano, al minimizar la posibilidad de crecimiento granular. También incrementando el trabajo en frío inicial se reduce el tamaño del grano final, al generar un número mayor de sitios de nucleación para nuevos granos. Finalmente, la presencia de una segunda fase en la microestructura ayuda a evitar el crecimiento del grano, manteniendo pequeño su tamaño cuando ha recristalizado.

## 7-9 Recocido y procesamiento de materiales

Los efectos de la recuperación, recristalización y crecimiento del grano son importantes en el procesamiento y uso final de un metal o de una aleación.

**Procesamiento por deformación** Aprovechando el tratamiento térmico por recocido, es posible incrementar la deformación total a realizarse. Si se necesita reducir una placa de 5 pul-

gadas de grueso a una hoja de 0.05 pulgadas de espesor, se puede efectuar el trabajo máximo permisible en frío, recocer para restablecer el metal a un estado blando y dúctil, y a continuación, de nuevo trabajarlo en frío. Se puede repetir este ciclo de trabajo en frío-recocido hasta acercarse al espesor correcto. El último paso de trabajo en frío podrá diseñarse para producir las dimensiones y propiedades finales que se deseen (ejemplo 7-6).

### EJEMPLO 7-6 Diseño de un proceso para producir tira de cobre

Se desea producir una tira de cobre de 0.1 cm de espesor y de 6 cm de ancho, que tenga por lo menos 60,000 psi de límite elástico y como mínimo 5% de elongación. Sólo es posible adquirir tiras de 6 cm de ancho con espesor de 5 cm. Diseñe un proceso que dé como resultado el producto deseado.

#### SOLUCIÓN

En el ejemplo 7-2, se encuentra que las propiedades requeridas pueden obtenerse mediante un trabajo en frío de 40 a 45%. Por tanto, el espesor inicial deberá estar entre 0.167 y 0.182 cm, y este material inicial debe ser lo más blando posible, esto es, en su condición recocida. Puesto que sólo se pudo adquirir materia prima de 5 cm de espesor, se debe reducir el espesor de la tira de 5 cm, a entre 0.167 y 0.182 cm y, por último, antes del trabajo en frío final, recocer la tira. Pero ¿será posible trabajar en frío exitosamente de 5 cm a 0.182 cm?

$$\% \text{ CW} = \frac{5 - 0.182}{5} \times 100 = 96.4\%$$

Con base en la figura 7-6 se permite un máximo de aproximadamente 90% de trabajo en frío. Se tiene, por tanto, que realizar una serie de ciclos de trabajo en frío y de recocido. Aunque existen muchas combinaciones posibles, una sería como sigue:

1. Trabaje en frío un 80% la tira de 5 cm, hasta llegar a 1 cm:

$$80 = \frac{5 - t_f}{5} \times 100 \quad \text{o} \quad t_f = 1 \text{ cm}$$

2. Efectúe el recocido de la tira de 1 cm para restablecer su ductilidad. Si no se conoce la temperatura de recristalización, se puede utilizar la relación  $0.4T_m$  para tener un estimado. El punto de fusión del cobre es 1085°C:

$$T_r \cong (0.4)(1085 + 273) = 543 \text{ K} = 270^\circ\text{C}$$

3. Trabaje en frío la tira de 1 cm de espesor, hasta llegar a 0.182 cm:

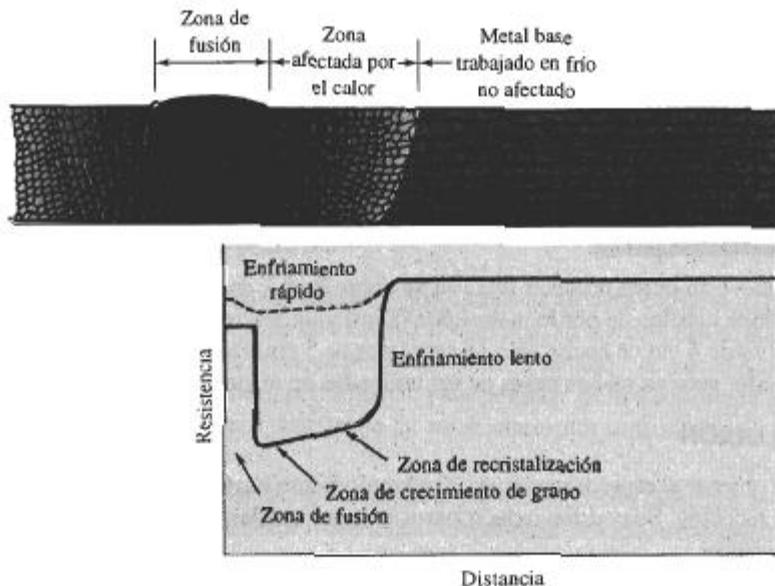
$$\% \text{ CW} = \frac{1 - 0.182}{1} \times 100 = 81.8\%$$

4. De nuevo, haga un recocido al cobre a 270°C para restablecer su ductilidad.
5. Finalmente, trabaje en frío 45%, de 0.182 cm hasta su dimensión final de 0.1 cm. Este proceso consigue las dimensiones y propiedades finales correctas.

**Servicio a alta temperatura** Ni el endurecimiento por deformación ni el endurecimiento por tamaño de grano son apropiados para una aleación que ha de utilizarse a temperaturas elevadas, como las aplicaciones que deben ser resistentes a la termofluencia. Cuando un metal trabajado en frío se pone en servicio a altas temperaturas, la recristalización causa de inmediato una catastrófica reducción de la resistencia. Además, si la temperatura es lo suficientemente al-

ta, la resistencia continuará disminuyendo, debido al crecimiento de nuevos granos recristalizados.

**Proceso de soldadura** Cuando se suelda un metal trabajado en frío con un soplete o arco eléctrico, el metal adyacente a la soldadura se calienta por encima de las temperaturas de recristalización y de crecimiento del grano. Esta región se llama **zona afectada por el calor**. La estructura y las propiedades de esta zona se muestran en la figura 7-19. Las propiedades se han mermado drásticamente, por el calor del proceso de soldadura.



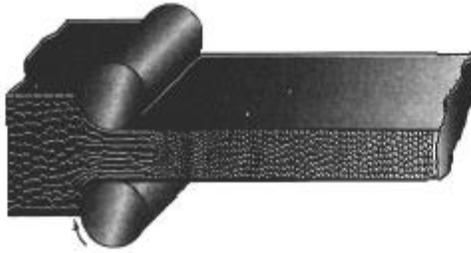
**FIGURA 7-19** Estructura y propiedades que rodean una soldadura por fusión en un metal trabajado en frío. Note la pérdida de resistencia causada por recristalización y crecimiento de grano en el área afectada por el calor.

Procesos de soldadura como el de haz de electrones y de láser que generan altos niveles de calor por muy breves periodos, minimizan la exposición del metal a temperaturas por encima de la recristalización y, por tanto, reducen este tipo de perjuicio.

## 7-10 Trabajo en caliente

Es posible darle una forma útil a un metal mediante trabajo en caliente, en vez de hacerlo en frío. El **trabajo en caliente** se define como la deformación plástica del metal a una temperatura superior a la temperatura de recristalización. Durante el trabajo en caliente, el metal se está cristalizando continuamente (figura 7-20).

**Carencia de endurecimiento** Durante la deformación por trabajo en caliente no hay endurecimiento; en consecuencia, prácticamente es ilimitada la deformación plástica; una placa muy gruesa puede ser reducida a una hoja delgada en una serie continua de operaciones. Los primeros pasos en el proceso se realizan a temperaturas muy por encima de la temperatura de recristalización, para aprovechar la menor resistencia del metal. El último paso se efectúa justo por encima de la temperatura de recristalización, con una deformación porcentual grande, a fin de producir el tamaño de grano más fino posible.



**FIGURA 7-20** Durante el trabajo en caliente, los granos alargados anisotrópicos se recristalizan de inmediato. Si la temperatura de trabajo en caliente se controla adecuadamente, el tamaño final de grano por trabajo en caliente puede resultar muy fino.

El trabajo en caliente es adecuado para el conformado de piezas grandes, ya que a temperaturas elevadas el metal tiene un límite elástico bajo y alta ductilidad. Además, a las temperaturas del trabajo en caliente los metales HC como el magnesio tienen un mayor número de sistemas de deslizamiento activos; su más alta ductilidad permite una mayor deformación que la posible mediante el trabajo en frío.

### EJEMPLO 7-7 Diseño de un proceso para producir una tira de cobre

De nuevo se desea producir una tira de cobre de 0.1 cm de espesor y 6 cm de ancho que tenga un límite elástico de por lo menos 60,000 psi y un 5% mínimo de elongación. Se puede adquirir una tira de 6 cm de ancho sólo en espesores de 5 cm. Diseñe un proceso para lograr el producto deseado, pero en menos pasos de los utilizados en el ejemplo 7-6.

#### SOLUCIÓN

Para obtener el espesor requerido, el ejemplo 7-6 se basó en una serie de ciclos de trabajo en frío y de recocido. Se podrían reducir pasos haciendo un laminado en caliente al espesor intermedio requerido:

$$\% \text{ HW} = \frac{5 - 0.182}{5} \times 100 = 96.4\%$$

$$\% \text{ HW} = \frac{5 - 0.167}{5} \times 100 = 96.7\%$$

Dado que ocurre la recristalización de manera simultánea con el trabajo en caliente, es factible obtener estas elevadas deformaciones y no es necesario un tratamiento de recocido por separado. Por lo que el diseño podría ser:

1. Trabajar en caliente 96.4% la tira de 5 cm, hasta el espesor intermedio de 0.182 cm.
2. Trabajar en frío 45% desde 0.182 cm hasta la dimensión final de 0.1 cm. Este diseño consigue las dimensiones y propiedades correctas.

**Eliminación de las imperfecciones** Algunas imperfecciones del metal original se pueden eliminar, o se pueden minimizar sus efectos. Los poros gaseosos pueden cerrarse y soldarse durante el trabajo en caliente, el agolpamiento interno de átomos, formado al cerrarse el poro, será eliminado por difusión durante el proceso de conformado y de enfriamiento. Las diferencias de composición en el metal también pueden reducirse, ya que el trabajo en caliente acerca la superficie hacia el centro de la placa, reduciendo así las distancias de difusión.

**Comportamiento anisotrópico** Las propiedades finales de piezas trabajadas en caliente no son isotrópicas. Los rodillos o dados de conformado, que normalmente están a una temperatura inferior a la del metal, enfrían su superficie más rápidamente que el centro de la pieza. Entonces, la superficie tendrá un tamaño de grano más fino que en el centro. Además, se produce una

estructura fibrosa al alargarse las inclusiones y las partículas de segunda fase en la dirección del trabajo.

**Acabado superficial y precisión dimensional** El acabado superficial por lo general es pobre junto al obtenido mediante el trabajo en frío. El oxígeno puede reaccionar con el metal de la superficie, formando óxidos que durante el conformado serán introducidos dentro de la superficie. En algunos metales, como el tungsteno y el berilio, el trabajo en caliente deberá efectuarse en atmósferas protectoras.

La precisión dimensional también es más difícil de controlar durante el trabajo en caliente. Debe tomarse en consideración una mayor deformación elástica, ya que a las temperaturas de trabajo en caliente el módulo de elasticidad es bajo y además, el metal se contrae al enfriarse. La combinación de la deformación elástica y la contracción térmica requiere que la pieza se fabrique sobredimensionada durante la deformación; los dados de conformación deben diseñarse cuidadosamente y es necesario un control preciso de la temperatura si se han de lograr dimensiones exactas.

## 7-11 Conformación superplástica

Cuando son tratados térmicamente y procesados de manera especial, algunos materiales pueden deformarse uniformemente de manera excepcional, en algunos casos, más de 1000 %. Este comportamiento se conoce como **superplasticidad**. A menudo, se puede acoplar un conformado superplástico con soldadura por difusión, para producir en una sola etapa ensamblajes complicados. A fin de que un material despliegue un comportamiento superplástico, es necesario que se cumplan varias condiciones:

1. El metal debe tener una estructura de grano muy fino, con diámetros menores a unos 0.005  $\mu\text{m}$ .
2. La aleación debe deformarse a una temperatura elevada, a menudo 0.5 a 0.65 veces la temperatura absoluta de fusión de la aleación.
3. Debe utilizarse una velocidad de conformado, es decir una **rapidez de deformación** muy lenta. Además, el esfuerzo requerido para deformar la aleación debe ser muy sensible a la velocidad de deformación. Si empieza a ocurrir estricción, esta región se deformará más aprisa; y, a su vez, el aumento de la velocidad endurecerá la región de estricción hasta detenerla y finalmente la deformación uniforme continuará.
4. Los bordes granulares en la aleación deberán permitir que los granos se deslicen fácilmente unos sobre otros y giren al aplicarse esfuerzo. Para que esto ocurra es necesario aplicar la temperatura correcta y tener un tamaño fino de grano.

La conformación superplástica se efectúa de manera más común en metales, incluyendo aleaciones como Ti-6% Al-4% V; Cu-10% Al, y Zn-23% Al. Los componentes aeroespaciales complejos frecuentemente se producen usando aleaciones superplásticas de titanio. Sin embargo, también puede encontrarse superplasticidad en materiales normalmente considerados como frágiles. Entre ellos están varios materiales cerámicos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{ZnO}_2$ ) y compuestos intermetálicos ( $\text{Ni}_3\text{Si}$ ).

### RESUMEN

Las propiedades de los metales pueden ser controladas combinando deformación plástica y simples tratamientos térmicos. Cuando se deforma un metal mediante trabajo en frío, se endurece por deformación, al introducir dislocaciones adicionales en la estructura. De esta manera, se pueden obtener importantes incrementos en resistencia. Los polímeros termoplásticos al deformarse se endurecen, pues las cadenas de moléculas se alinean (aunque lo anterior no es un endurecimiento por deformación). El endurecimiento en materiales frágiles, como los cerámicos es casi nulo. En los metales:

- El endurecimiento por deformación, además de incrementar resistencia y dureza, aumenta los esfuerzos residuales, produce comportamiento anisotrópico y reduce la ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión.
- El endurecimiento total por deformación está limitado en razón a la reducción simultánea de ductilidad; los metales CCC generalmente tienen una mejor respuesta al endurecimiento.
- El endurecimiento por deformación no resulta eficaz a temperaturas elevadas, ya que el efecto del trabajo en frío es eliminado por la recristalización.
- El recocido es un tratamiento térmico diseñado para eliminar todos o parte de los efectos del endurecimiento por deformación. El proceso de recocido puede implicar máximo tres pasos.
  - La recuperación se da a bajas temperaturas y elimina esfuerzos residuales, y restablece la conductividad eléctrica sin reducir la resistencia. Un recocido de “liberación de esfuerzos” es una recuperación.
  - A temperaturas más elevadas ocurre la recristalización, la cual elimina prácticamente todos los efectos del endurecimiento por deformación. La densidad de las dislocaciones se reduce dramáticamente durante la recristalización, al ocurrir la nucleación y el crecimiento de nuevos granos.
  - El crecimiento de granos, que normalmente debería evitarse, ocurrirá a temperaturas más elevadas.
- El trabajo en caliente combina en un solo paso la deformación plástica y el recocido, permitiendo grandes cantidades de deformación plástica sin hacer frágil al material.
- La deformación superplástica consigue en algunos materiales cantidades extraordinariamente grandes de deformación. Para el conformado superplástico es necesario un cuidadoso control de la temperatura, del tamaño de grano y de la velocidad de deformación.

## GLOSARIO

**Coefficiente de endurecimiento por deformación** Efecto que tiene la deformación en la resistencia resultante del material. Un material con un alto coeficiente de endurecimiento por deformación adquiere una elevada resistencia con sólo pequeñas cantidades de deformación.

**Estructura poligonizada** Organización subgranular producida en las primeras etapas del recocido. Los bordes subgranulares forman una red de dislocaciones reorganizadas durante el calentamiento.

**Esfuerzos residuales** Esfuerzos introducidos en un material durante su procesamiento, que en vez de causar la deformación del mismo, se conservan almacenados en su estructura. La liberación posterior de estos esfuerzos bajo la forma de deformación puede resultar un problema.

**Endurecimiento por deformación** Tratamiento para endurecer un material al incrementar el número de dislocaciones mediante deformación, es decir trabajo en frío. También se le conoce como endurecimiento por trabajado mecánico.

**Endurecimiento por trabajado mecánico** Término que a veces se utiliza en vez de endurecimiento por deformación, o trabajo en frío, para describir el efecto de la deformación sobre el endurecimiento de los materiales.

**Extrusión** Técnica de procesamiento por deformación mediante la cual un material es empujado a través de la abertura de un dado.

**Fuente de Frank-Read** Dislocación fija que, bajo un esfuerzo aplicado, produce dislocaciones adicionales. Este mecanismo es responsable, por lo menos en parte, del endurecimiento por deformación.

**Granallado** Introducción de esfuerzos residuales de compresión sobre la superficie de una pieza, bombardeando dicha superficie con granalla de acero. Los esfuerzos residuales pueden mejorar el rendimiento general del material.

**Rapidez de deformación** Velocidad a la cual se deforma el material. Un material puede comportarse de manera muy distinta si se prensa lentamente para darle forma en vez de lograr la conformación rápidamente con un impacto.

**Recuperación** Tratamiento térmico de recocido a baja temperatura, diseñado para eliminar esfuerzos residuales introducidos durante la deformación, sin reducir la resistencia del material trabajado en frío.

**Recocido** Tratamiento térmico utilizado para eliminar una parte o la totalidad de los efectos del trabajo en frío.

**Recocido para relevado de esfuerzos** Etapa de recuperación del tratamiento térmico del recocido, durante el cual se eliminan los esfuerzos residuales, sin reducir las propiedades mecánicas del material.

**Recristalización** Tratamiento térmico de recocido a temperatura media, diseñado para eliminar todos los efectos del endurecimiento por deformación, producidos durante el trabajo en frío. Este proceso debe realizarse por encima de la temperatura de recristalización del material trabajado.

**Superplasticidad** Capacidad de un material para deformarse de manera uniforme en un porcentaje extraordinariamente elevado. Es necesario un control cuidadoso de temperatura, tamaño del grano y de rapidez de deformación, para que un material se comporte de manera superplástica.

**Textura fibrosa** Orientación preferencial de los granos obtenida en el proceso de trefilado. Ciertas direcciones cristalográficas en cada grano se alinean con la dirección del trefilado, generando un comportamiento anisotrópico.

**Textura foliada o laminar** Orientación preferencial de los granos, obtenida durante el proceso de laminado. Ciertas direcciones cristalográficas se alinean en el sentido de la laminación, y un plano preferencial cristalográfico se hace paralelo a la superficie de la hoja o lámina.

**Trabajo en caliente** Deformación de un metal por encima de su temperatura de recristalización. Durante el trabajo en caliente, sólo se modifica la forma del metal; su resistencia se conserva relativamente sin cambios, porque no ocurre endurecimiento por deformación.

**Trabajo en frío** Deformación de un metal por debajo de su temperatura de recristalización. Durante el trabajo en frío aumenta el número de dislocaciones, haciendo que el metal se endurezca al mismo tiempo que se modifica su forma.

**Trefilado** Una técnica de procesamiento por deformación mediante la cual un material es tirado a través de la abertura de un dado.

**Zona afectada por el calor** Área adyacente a una soldadura, que durante el proceso se calienta por encima de la temperatura crítica a la cual ocurren cambios en la estructura, como crecimiento de grano o recristalización.

## PROBLEMAS

**7-1** Una barra de metal de 0.505 pulgadas de diámetro, con una longitud calibrada de 2 pulgadas, se sujeta a un ensayo a la tensión. Se efectúan las siguientes mediciones:

Fuerza (lb)	Longitud calibrada (plg)	Diámetro (plg)
27,500	2.2103	0.4800
27,000	2.4428	0.4566
25,700	2.6997	0.4343

Determine el coeficiente de endurecimiento por deformación del metal. ¿El metal será más probablemente CCC, CC o bien HC? Explique.

**7-2** Una barra de metal de 1.5 cm de diámetro, con una longitud calibrada de 3 cm, se somete a un ensayo de tensión. Se efectúan las siguientes mediciones:

Fuerza (N)	Longitud calibrada (cm)	Diámetro (cm)
16,240	3.6642	1.2028
19,066	4.4754	1.0884
19,273	5.4663	0.9848

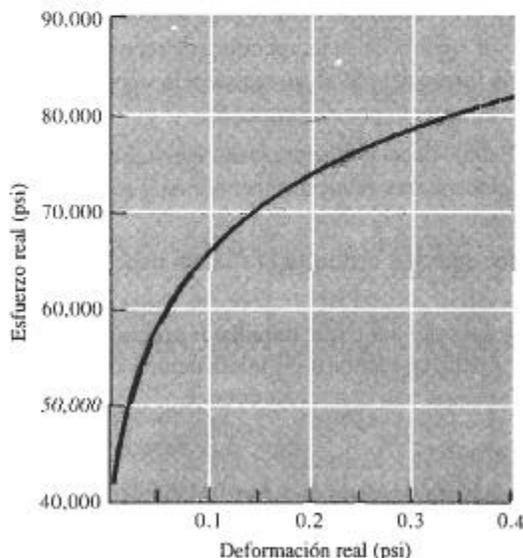
Determine el coeficiente de endurecimiento por deformación para el metal. ¿El metal es más probablemente CCC, CC o HC? Explique.

**7-3** En la figura 7-21 se muestra una curva esfuerzo real-deformación real. Determine el coeficiente de endurecimiento por deformación para el metal.

**7-4** Una barra de tensión de una aleación Cu-30% Zn tiene un coeficiente de endurecimiento por deformación de 0.50. La barra, que tiene un diámetro inicial de 1 cm y una longitud calibrada inicial de 3 cm, falla a un esfuerzo de deformación ingenieril de 120 MPa. Después de la fractura, la longitud calibrada es 3.5 cm y el diámetro 0.926 cm. No ocurrió encuellamiento. Calcule el esfuerzo real cuando la deformación real es de 0.05 cm/cm.

**7-5** La fuente Frank-Read que se muestra en la figura 7-3(e) ha creado cuatro lazos o rizados de dislocación a partir de la línea original de dislocación. Estime la línea de dislocación total presente en la fotografía y determine el porcentaje de incremento en la longitud de las dislocaciones producidas por la deformación.

**7-6** Una placa de cobre de 0.25 pulgadas de espesor debe trabajarse en frío un 63%. Determine el espesor final.



**FIGURA 7-21** Curva esfuerzo real-deformación real (para el problema 7-3).

**7-7** Una barra de cobre de 0.25 pulgadas de diámetro debe ser trabajada en frío un 63%. Determine su diámetro final.

**7-8** Una varilla de cobre de 2 pulgadas de diámetro se reduce a un diámetro de 1.5 pulgadas, y posteriormen-

te se reduce de nuevo a un diámetro final de 1 pulgada. En un segundo caso, la varilla de 2 pulgadas de diámetro se reduce en un solo paso a 1 pulgada de diámetro. Calcule en ambos casos el porcentaje de trabajo en frío.

**7-9** Una placa de aluminio 3105 se reduce de 1.75 a 1.15 pulgadas. Determine las propiedades finales de la misma (figura 7-22).

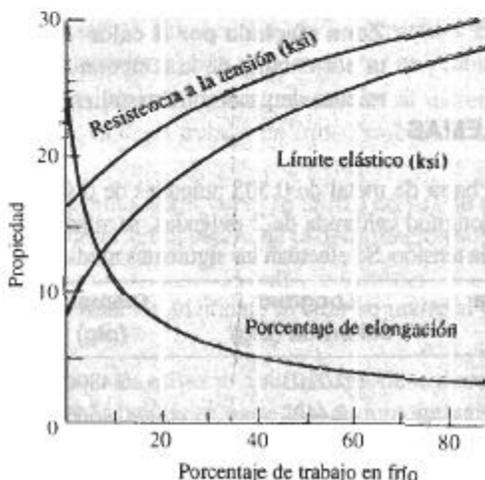
**7-10** Una barra de latón de Cu-30% Zn se reduce de un diámetro de 1 pulgada hasta un diámetro de 0.45 pulgadas. Determine las propiedades finales de la barra (figura 7-23).

**7-11** Una barra de aluminio 3105 es reducida de 1 pulgada de diámetro a 0.8 pulgadas de diámetro, y luego a 0.6 y finalmente a 0.4. Determine el porcentaje del trabajo en frío y las propiedades después de cada uno de los pasos del proceso. Calcule el porcentaje total de trabajo en frío (figura 7-22).

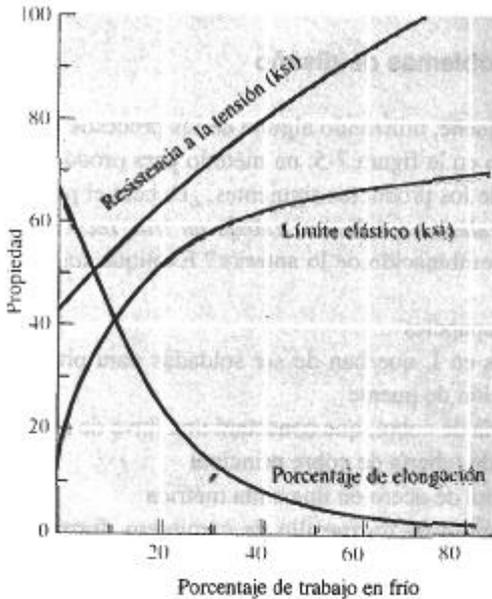
**7-12** Se desea que una barra de cobre tenga una resistencia a la tensión de por lo menos 70,000 psi y un diámetro final de 0.375 pulgadas. ¿Cuál será el diámetro mínimo de la barra original? (Figura 7-6).

**7-13** Se desea que una placa de latón Cu-30% Zn originalmente de un espesor de 1.2 pulgadas, tenga un límite elástico superior a 50,000 psi y un porcentaje de elongación de por lo menos 10%. ¿Qué rango de espesores finales deben obtenerse? (Figura 7-23).

**7-14** Se desea que una hoja de cobre tenga por lo menos un límite elástico de 50,000 psi y como mínimo 10% de elongación, con un espesor final de 0.12 pul-



**FIGURA 7-22** Efecto del porcentaje del trabajo en frío sobre las propiedades de la aleación 3105 de aluminio.



**FIGURA 7-23** Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades de un latón Cu-30% Zn.

gadas. ¿Qué rango de espesores originales deben ser utilizados? (Figura 7-6).

**7-15** Una placa de aluminio 3105 previamente trabajada en frío 20% tiene 2 pulgadas de espesor. Entonces, se trabaja la placa adicionalmente en frío hasta llegar a 1.3 pulgadas. Calcule el porcentaje total de trabajo en frío y determine las propiedades finales de la placa (Figura 7-22.)

**7-16** Una tira de aluminio-litio de 0.25 pulgadas de espesor y 2 pulgadas de ancho debe cortarse de una hoja laminada, según se describe en la figura 7-9. La cinta debe ser capaz de soportar una carga de 35,000 libras sin deformación plástica. Determine el rango de orientaciones a partir del cual se puede cortar la tira de la hoja laminada.

**7-17** Se desea trefilar un alambre de cobre de 0.3 pulgadas de diámetro con un límite elástico de 20,000 psi hasta llegar a un alambre de 0.25 pulgadas de diámetro.

(a) Encuentre la fuerza de tracción, suponiendo que no exista fricción.

(b) ¿Se romperá el alambre al tirar de él durante el proceso de trefilado? Demuéstrese (figura 7-6).

**7-18** Un alambre de aluminio 3105 debe ser trefilado, para obtener alambre de 1 mm de diámetro, con un límite elástico de 20,000 psi.

(a) Encuentre el diámetro original del alambre,

(b) calcule la fuerza de tracción requerida, y

(c) determine si el alambre al trefilarse se romperá durante el proceso (figura 7-22).

**7-19** Se obtuvieron los siguientes datos al recocer un metal trabajado en frío.

(a) Estime las temperaturas de recuperación, de recristalización y de crecimiento de grano,

(b) recomiende una temperatura adecuada para un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos,

(c) recomiende una temperatura adecuada para un proceso de trabajo en caliente, y

(d) estime la temperatura de fusión de la aleación.

Temperatura de recocido (°C)	Conductividad eléctrica (ohms <sup>-1</sup> ·cm <sup>-1</sup> )	Límite elástico (MPa)	Tamaño de grano (mm)
400	$3.04 \times 10^5$	86	0.10
500	$3.05 \times 10^5$	85	0.10
600	$3.36 \times 10^5$	84	0.10
700	$3.45 \times 10^5$	83	0.098
800	$3.46 \times 10^5$	52	0.030
900	$3.46 \times 10^5$	47	0.031
1000	$3.47 \times 10^5$	44	0.070
1100	$3.47 \times 10^5$	42	0.120

**7-20** Los siguientes datos se obtuvieron al recocer un metal trabajado en frío.

(a) Estime las temperaturas de recuperación, de recristalización y de crecimiento de grano,

(b) recomiende una temperatura adecuada para obtener un alambre de alta resistencia y alta conductividad eléctrica,

(c) recomiende una temperatura adecuada para un proceso de trabajo en caliente y

(d) estime la temperatura de fusión de la aleación.

Temperatura de recocido (°C)	Esfuerzos residuales (psi)	Límite elástico (psi)	Tamaño de grano (μg)
250	21,000	52,000	0.0030
275	21,000	52,000	0.0030
300	5,000	52,000	0.0030
325	0	52,000	0.0030
350	0	34,000	0.0010
375	0	30,000	0.0010
400	0	27,000	0.0035
425	0	25,000	0.0072

**7-21** Una aleación de titanio contiene una dispersión muy fina de partículas minúsculas de  $\text{Er}_2\text{O}_3$ . ¿Cuál será el efecto de estas partículas en la temperatura de creci-

miento de grano y en el tamaño de los granos, a cualquier temperatura de recocido en? Explique.

**7-22** Determine el número ASTM de tamaño de grano de cada una de las microfotografías de la figura 7-17, y grafique el número de tamaño de grano en función de la temperatura de recocido.

**7-23** Utilizando los datos de la tabla 7-3 grafique la temperatura de recristalización en función de la temperatura de fusión de cada metal, utilizando temperaturas absolutas (Kelvin). Mida la pendiente y compárela con la relación esperada entre ambas temperaturas. ¿Resulta adecuada la aproximación?

**7-24** Se desea producir una placa de 0.3 pulgadas de espesor de aluminio 3105 con una resistencia a la tensión de por lo menos 25,000 psi y un porcentaje de elongación de por lo menos 5%. El espesor original de la placa es de 3 pulgadas. El máximo de trabajo en frío en cada paso es del 80%. Describa los pasos de trabajo en frío y de recocido necesarios para fabricar este producto. Compare este proceso con el que recomendaría si pudiera hacer la deformación inicial con trabajo en caliente (figura 7-22).

**7-25** Se desea producir un alambre de cobre de 0.2 pulgadas de diámetro, con un límite elástico mínimo de 60,000 psi y un porcentaje mínimo de elongación de 5%. El diámetro original de la varilla es 2 pulgadas y el trabajo en frío máximo de cada paso 80%. Describa los pasos de trabajo en frío y recocido necesarios para fabricar este producto. Compare el proceso con el que recomendaría si pudiera efectuar la deformación inicial con trabajo en caliente (figura 7-6).

## Á Problemas de diseño

**7-26** Diseñe, utilizando alguno de los procesos que se muestran en la figura 7-5, un método para producir cada uno de los productos siguientes. ¿Deberá el proceso incluir trabajo en caliente, trabajo en frío, recocido, o alguna combinación de lo anterior? Explique sus decisiones.

(a) sujetapapeles

(b) vigas en I, que han de ser soldadas para producir una sección de puente

(c) tubería de cobre, que conectará una llave de agua al sistema de tubería de cobre principal

(d) la cinta de acero en una cinta métrica

(e) la cabeza de un martillo de carpintero, formada a partir de una barra redonda

**7-27** Se planea unir por soldadura dos hojas de cobre trabajadas en frío. (La soldadura implica calentar el metal a una temperatura lo suficientemente alta para que un material de relleno se funda y se introduzca en la unión.) Diseñe un proceso de soldadura que no ablande el cobre. Explique. ¿Se podrían utilizar temperaturas de soldadura más elevadas, si el material de la hoja fuera una aleación Cu-30% Zn? Explique.

**7-28** Se desea producir un alambre de cobre de 1 mm de diámetro, con un límite elástico mínimo de 60,000 psi y un porcentaje mínimo de elongación de 5%. Se iniciará con una varilla de 20 mm de diámetro. Diseñe el proceso mediante el cual se pueda trefilar el alambre. Incluya todos los detalles de importancia y explique.

# CAPÍTULO 8

## Principios de endurecimiento por solidificación y procesamiento

### 8-1 Introducción

En prácticamente todos los metales y aleaciones, así como en muchos semiconductores, compuestos, cerámicos y polímeros, el material en algún momento de su procesamiento es líquido. El líquido se solidifica al enfriarse por debajo de su temperatura de solidificación. El material puede ser utilizado tal y como se solidificó o puede ser procesado posteriormente mediante trabajo mecánico o tratamiento térmico. Las estructuras producidas durante la solidificación afectan las propiedades mecánicas e influyen sobre el tipo de procesamiento posterior. En particular, se puede controlar la forma y el tamaño de los granos mediante la solidificación.

Durante la solidificación, el arreglo atómico cambia de un orden de corto alcance a un orden de largo alcance, es decir, a una estructura cristalina. La solidificación requiere de dos pasos: nucleación y crecimiento. La **nucleación** ocurre cuando se forma una pequeña porción sólida dentro del líquido. El **crecimiento** del núcleo ocurre cuando los átomos del líquido se van uniendo al sólido hasta que se acabe el líquido.

En este capítulo se presentan los principios de la solidificación de los materiales puros. En capítulos subsecuentes veremos cómo la solidificación difiere en las aleaciones y en los materiales que están constituidos por varias fases.

### 8-2 Nucleación

Es de esperarse que un material se solidifique cuando el líquido se enfríe justo por debajo de su temperatura de fusión o congelamiento, ya que la energía asociada con la estructura cristalina del sólido es en ese momento menor que la energía del líquido. Esta diferencia en energía entre líquido y sólido es el cambio de energía libre de volumen  $\Delta G_v$ ; conforme aumenta de tamaño el sólido,  $\Delta G_v$  se hace mayor.

Sin embargo, cuando se forma el sólido, se crea una interfase entre éste y el resto del líquido (figura 8-1). A esta interfase se le asocia una energía libre de superficie  $\sigma$ ; cuanto más grande sea el sólido, mayor será el incremento en energía de superficie. Entonces, el cambio total de energía  $\Delta G$ , que se muestra en la figura 8-2, es

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma, \quad (8-1)$$

donde  $\frac{4}{3}\pi r^3$  es el volumen de un embrión esférico de radio  $r$ ;  $4\pi r^2$  es el área de la superficie del mismo,  $\sigma$  es la energía libre de superficie y  $\Delta G_v$  es el cambio de energía libre de volumen, el cual es negativo.

Cuando el sólido es muy pequeño (menor que  $r^*$  en la figura 8-2), un crecimiento adicional hace que aumente la energía libre. En vez de crecer, el sólido se vuelve a fundir para reducir la energía libre; entonces, el metal permanece en estado líquido. Este sólido pequeño se conoce como **embrión**. El líquido está subenfriado ya que está por debajo de la temperatura de solidificación al equilibrio. El **subenfriamiento**  $\Delta T$  es la temperatura de solidificación al equilibrio, menos la temperatura real del líquido.

Pero cuando el sólido es mayor que  $r^*$ , el crecimiento adicional hace que la energía total del sistema se reduzca, por lo que el sólido formado es estable. La nucleación ocurrió con éxito y ahora se dará el crecimiento de la partícula sólida denominada **núcleo**.

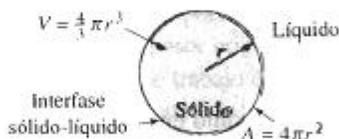


FIGURA 8-1 Se crea una interfase cuando se forma un sólido a partir del líquido.

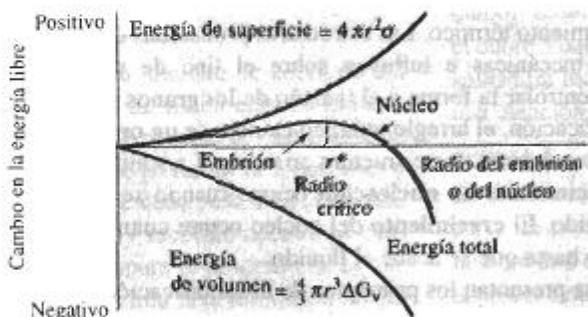


FIGURA 8-2 La energía libre total de un sistema sólido-líquido cambia según el tamaño del sólido. El sólido se denomina embrión si su radio es menor que el radio crítico, y se trata de un núcleo si su radio es mayor que el radio crítico.

**Nucleación homogénea** Cuando el líquido se enfría lo suficiente por debajo de la temperatura de solidificación de equilibrio, se combinan dos factores para favorecer la nucleación. Primero, se agrupan los átomos para formar embriones más grandes. Segundo, la mayor diferencia en energía libre de volumen entre el líquido y el sólido reduce el tamaño crítico del núcleo. La **nucleación homogénea** ocurre cuando el subenfriamiento es lo suficiente como para causar la formación de un núcleo estable.

El tamaño del **radio crítico**  $r^*$  está dado por

$$r^* = \frac{2\sigma T_m}{\Delta H_f \Delta T}, \quad (8-2)$$

donde  $\Delta H_f$  es el calor latente de fusión,  $T_m$  es la temperatura de solidificación de equilibrio en Kelvin, y  $\Delta T = T_m - T$  es el subenfriamiento cuando la temperatura del líquido es  $T$ . El **calor**

**TABLA 8-1** Valores para la temperatura de solidificación, calor latente de fusión, energía de superficie y subenfriamiento máximo observado para materiales seleccionados

Metal	Temperatura de solidificación (°C)	Calor latente de fusión (J/cm <sup>3</sup> )	Energía de superficie (J/cm <sup>2</sup> )	Subenfriamiento típico para la nucleación homogénea (°C)
Ga	30	488	$56 \times 10^{-7}$	76
Bi	271	543	$54 \times 10^{-7}$	90
Pb	327	237	$33 \times 10^{-7}$	80
Ag	962	965	$126 \times 10^{-7}$	250
Cu	1085	1628	$177 \times 10^{-7}$	236
Ni	1453	2756	$255 \times 10^{-7}$	480
Fe	1538	1737	$204 \times 10^{-7}$	420
NaCl	801			169
CsCl	645			152
H <sub>2</sub> O	0			40

**latente de fusión** representa el calor cedido durante la transformación de líquido a sólido. Conforme se incrementa el subenfriamiento, el radio crítico requerido para la nucleación disminuye. La tabla 8-1 presenta valores para  $\sigma$ ,  $\Delta H_f$  y subenfriamientos típicos observados de manera experimental para una nucleación homogénea.

**EJEMPLO 8-1**

Calcule el tamaño del radio crítico y el número de átomos en el núcleo crítico, cuando se forma cobre sólido por nucleación homogénea.

**SOLUCIÓN**

De la tabla 8-1:

$$\begin{aligned} \Delta T &= 236^\circ\text{C} & T_m &= 1085 + 273 = 1358 \text{ K} \\ \Delta H_f &= 1628 \text{ J/cm}^3 \\ \sigma &= 177 \times 10^{-7} \text{ J/cm}^2 \\ r^* &= \frac{2\sigma T_m}{\Delta H_f \Delta T} = \frac{(2)(177 \times 10^{-7})(1358)}{(1628)(236)} = 12.51 \times 10^{-8} \text{ cm} \end{aligned}$$

El parámetro de red para el cobre CCC es  $a_0 = 0.3615 \text{ nm} = 3.615 \times 10^{-8} \text{ cm}$

$$\begin{aligned} V_{\text{celda unitaria}} &= (a_0)^3 = (3.615 \times 10^{-8})^3 = 47.24 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 \\ V_{r^*} &= \frac{4}{3}\pi r^3 = \left(\frac{4}{3}\pi\right)(12.51 \times 10^{-8})^3 = 8200 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

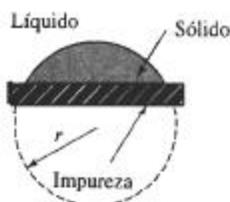
El número de celdas unitarias en el núcleo crítico es

$$\frac{8200 \times 10^{-24}}{47.24 \times 10^{-24}} = 174 \text{ celdas unitarias}$$

Puesto que en los metales CCC hay 4 átomos en cada celda unitaria, el número de átomos en el núcleo crítico deberá ser:

(4 átomos por celda)(174 celdas por núcleo) = 696 átomos por núcleo

**Nucleación heterogénea** A excepción de experimentos fuera de lo común en laboratorios, la nucleación homogénea nunca ocurre en los metales líquidos. En lugar de ello, las impurezas que están en contacto con el líquido, ya sea en suspensión o sobre las paredes del recipiente que lo contiene, proveen una superficie sobre la cual se puede formar el sólido (figura 8-3). Ahora se tiene un radio de curvatura mayor que el crítico, con una superficie total muy pequeña entre sólido y líquido. Solamente necesitan agruparse unos cuantos átomos para producir una partícula sólida con el radio de curvatura requerido. Para alcanzar este tamaño crítico se necesita menos subenfriamiento, por lo que la nucleación empieza con mayor facilidad. La nucleación sobre superficies de impurezas se conoce como **nucleación heterogénea**.



**FIGURA 8-3** Una formación de un sólido sobre una impureza puede tener el radio crítico con un incremento menor en energía superficial. Así, con subenfriamientos relativamente bajos puede ocurrir la nucleación heterogénea.

**Endurecimiento por tamaño de grano** Algunas veces se introducen intencionalmente partículas de impureza en el líquido. Esta práctica se conoce como **refinación de grano** o **inoculación**. por ejemplo, se agrega una combinación de 0.03% de titanio y de 0.01% de boro a muchas aleaciones líquidas de aluminio. Se forman pequeñas partículas de  $Al_3Ti$  o de  $TiB_2$  que sirven como sitios para la nucleación heterogénea. La refinación de grano o inoculación produce gran número de granos, cada uno de los cuales empieza a crecer a partir de un núcleo. En los metales, cuanto mayor sea el área superficial de los bordes de grano, mayor será el endurecimiento por tamaño de grano.

**Vidrios** En enfriamientos muy rápidos, pudiera no haber el tiempo suficiente para que los núcleos se formen y crezcan. Cuando esto ocurre, la estructura líquida se congela, formándose un sólido amorfo o vítreo. La estructura cristalina compleja de muchos materiales cerámicos poliméricos, impide la nucleación de una estructura cristalina durante la solidificación, incluso a bajas velocidades de enfriamiento.

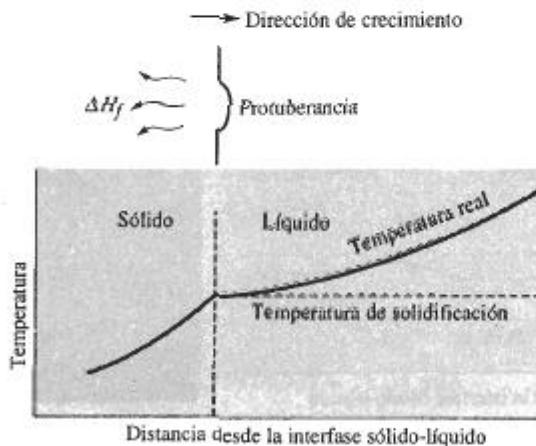
En los metales, sin embargo, se requieren velocidades de enfriamiento de  $10^6$  °C/s o más para suprimir la nucleación de la estructura cristalina. La producción de vidrios metálicos mediante el enfriamiento rápido así como de otras estructuras únicas, se conoce como **procesamiento por solidificación rápida**. Se obtienen estas altas velocidades de enfriamiento utilizando pequeñas partículas de polvo metálico, o bien formando cintas metálicas delgadas y continuas, de aproximadamente 0.0015 plg de espesor.

Los vidrios metálicos incluyen complejas aleaciones hierro-níquel-boro que contienen cromo, fósforo, cobalto y otros elementos. Algunos vidrios metálicos obtienen resistencias superiores a 500,000 psi, manteniendo al mismo tiempo una tenacidad a la fractura de más de 10,000 psi  $\sqrt{plg}$ . Su excelente resistencia a la corrosión, sus propiedades magnéticas y otras propiedades físicas, hacen que estos materiales resulten atractivos para aplicaciones en potencia eléctrica, motores de aeronaves, herramientas y moldes, así como magnetismo.

## 8-3 Crecimiento

Una vez formados los núcleos, el crecimiento ocurre conforme los átomos se integran a la superficie del sólido. La naturaleza del crecimiento del sólido dependerá de la forma en que se va extrayendo el calor del sistema. Deben extraerse dos tipos de calor: el calor específico del líquido y el calor latente de fusión. El **calor específico** es el calor necesario para cambiar en un grado la temperatura de una unidad de peso de material. El calor específico deberá ser eliminado primero, ya sea por radiación hacia la atmósfera circundante, o por conducción a través del molde que contiene el material, hasta que el líquido se enfríe a su temperatura de solidificación. Antes de que se complete la solidificación deberá eliminarse de la interfase sólido-líquido el calor latente de fusión. La manera en la cual se libere o retire este calor determinará el mecanismo de crecimiento de los núcleos y la estructura final.

**Crecimiento planar** Cuando un líquido bien inoculado se enfría al equilibrio, la temperatura del líquido es mayor que la temperatura de solidificación, y la temperatura del sólido está en o por debajo de esa temperatura. Durante la solidificación, el calor latente de fusión es eliminado por conducción desde la interfase sólido-líquido, a través del sólido y hacia los alrededores. Cualquier pequeña protuberancia que empiece a crecer en la interfase estará rodeada de líquido con una temperatura mayor a la de solidificación (figura 8-4). El crecimiento de la protuberancia se detendrá hasta que el resto de la interfase la alcance. Este mecanismo de crecimiento se conoce como **crecimiento planar**, y ocurre por el desplazamiento de la interfase sólido-líquido lisa o plana hacia el líquido.



**FIGURA 8-4** Cuando la temperatura del líquido está por encima de la temperatura de solidificación, una protuberancia existente en la interfase sólido-líquido no crecerá, conservándose una interfase plana. El calor latente se elimina de la interfase a través del sólido.

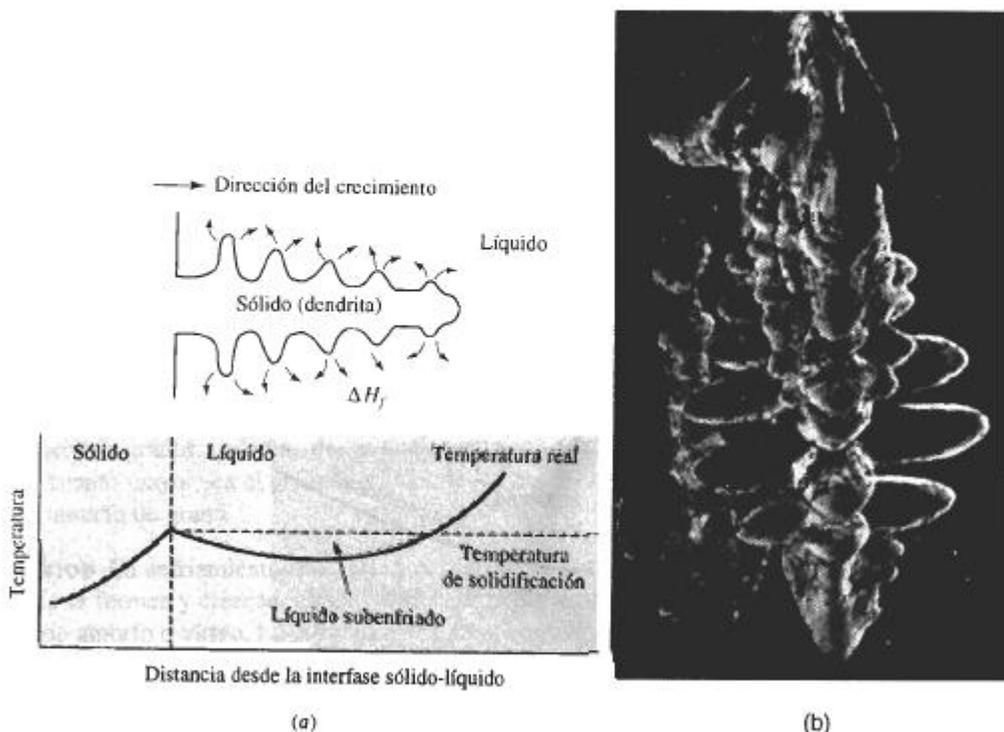
**Crecimiento dendrítico** Cuando la nucleación es débil, el líquido se subenfía antes de que se forme el sólido (figura 8-5). Bajo estas condiciones, una protuberancia sólida pequeña, llamada **dendrita** se forma y crea en la interfase. Conforme crece la dendrita, el calor latente de fusión pasa al líquido subenfriado, elevando su temperatura hacia la temperatura de solidificación. En los troncos de las dendritas primarias también pueden crecer brazos secundarios y terciarios para acelerar la liberación del calor latente de transformación. El crecimiento dendrítico

continúa hasta que el líquido subenfriado alcanza la temperatura de solidificación. Cualquier líquido restante se solidificará entonces mediante el mecanismo de crecimiento planar. La diferencia entre el crecimiento planar y el dendrítico ocurre debido a las distintas formas de disipar del calor latente. El recipiente o molde debe absorber el calor en el crecimiento planar, mientras que en el crecimiento dendrítico el calor es absorbido por el líquido subenfriado.

En los metales puros, el crecimiento dendrítico normalmente representa sólo una pequeña fracción del crecimiento total:

$$\text{Fracción dendrítica} = f = \frac{c\Delta T}{\Delta H_f}, \quad (8-3)$$

donde  $c$  es el calor específico del líquido. El numerador representa el calor que puede absorber el líquido subenfriado y el calor latente en el denominador representa el calor total que debe liberarse durante la solidificación. Por lo que a mayor subenfriamiento  $\Delta T$ , mayor crecimiento dendrítico.



**FIGURA 8-5** (a) Si el líquido está subenfriado, una protuberancia en la interfase sólido-líquido puede crecer rápidamente en forma dendrítica. El calor latente de fusión es absorbido por el líquido subenfriado y se eleva su temperatura hasta la temperatura de solidificación. (b) Microfotografía electrónica de dendritas en el acero ( $\times 15$ ).

## 8-4 Tiempo de solidificación y tamaño de las dendritas

La rapidez a la cual el sólido crece depende de la velocidad de enfriamiento, o de la rapidez de extracción de calor. Una velocidad de enfriamiento rápida produce una solidificación rápida, o

tiempos de solidificación cortos. Utilizando la *regla de Chvorinov* puede calcularse el tiempo  $t_s$  requerido para que una fundición simple se solidifique completamente:

$$t_s = B \left( \frac{V}{A} \right)^n, \quad (8-4)$$

donde  $V$  es el volumen de la fundición y representa la cantidad de calor que debe ser eliminada, antes de que ocurra la solidificación.  $A$  es el área de la superficie de la fundición que está en contacto con el molde y representa la superficie por la cual se va a extraer el calor de la fundición;  $n$  es una constante (generalmente 2) y  $B$  es la *constante del molde*, la cual depende de las propiedades y temperaturas iniciales tanto del metal como del molde.

### EJEMPLO 8-2 Rediseño de una fundición para mejorar su resistencia

Actualmente se produce una pieza de latón en forma de disco de 2 plg de espesor y 18 plg de diámetro. Se cree que si la fundición se solidifica un 25% más aprisa, el aumento en la resistencia a la tensión del material permitirá que la pieza sea más ligera. Diseñe la fundición para lograrlo. Suponga que para este proceso en particular la constante del molde es 22 min/plg<sup>2</sup>.

#### SOLUCIÓN

Esto se puede lograr utilizando el mismo proceso de fundición, pero reduciendo el espesor del material. La fundición menos gruesa se solidificará más aprisa y, debido a este enfriamiento acelerado, tendrá mejores propiedades mecánicas. La regla de Chvorinov nos ayuda a calcular el espesor requerido. Si  $d$  es el diámetro y  $x$  es el espesor de la pieza, entonces el volumen, el área de la superficie y el tiempo de solidificación de un disco de 2 plg de espesor son:

$$\begin{aligned} V &= (\pi/4)d^2x = (\pi/4)(18)^2(2) = 508.9 \text{ plg}^3 \\ A &= 2(\pi/4)d^2 + \pi dx = 2(\pi/4)(18)^2 + \pi(18)(2) = 622 \text{ plg}^2 \\ t &= B \left( \frac{V}{A} \right)^2 = (22) \left( \frac{508.9}{622} \right)^2 = 14.72 \text{ min} \end{aligned}$$

El tiempo de solidificación para la fundición rediseñada deberá ser un 25% más corto que el actual, eso quiere decir que  $t_r = 0.75t$ :

$$t_r = 0.75t = (0.75)(14.72) = 11.04 \text{ min}$$

Dado que las condiciones del proceso no han sido modificadas, tampoco cambia la constante de molde  $B$ . La relación  $V/A$  de la nueva fundición es:

$$\begin{aligned} t_r &= B \left( \frac{V}{A} \right)^2 = (22) \left( \frac{V}{A} \right)^2 = 11.04 \text{ min} \\ \left( \frac{V}{A} \right)^2 &= 0.5018 \quad \circ \quad \frac{V}{A} = 0.708 \end{aligned}$$

Si  $x$  es el espesor requerido para la pieza rediseñada, entonces:

$$\begin{aligned} \frac{V_r}{A_r} &= \frac{(\pi/4)d^2x}{2(\pi/4)d^2 + \pi dx} = \frac{(\pi/4)(18)^2(x)}{2(\pi/4)(18)^2 + \pi(18)(x)} = 0.708 \\ x &= 1.68 \text{ plg} \end{aligned}$$

Este espesor proporciona el tiempo de solidificación requerido y en consecuencia, el peso total de la fundición se reduce casi un 15%.

La solidificación empieza por la superficie desde donde se transfiere el calor hacia el material del molde. La rapidez de solidificación de una fundición se describe mediante la rapidez de crecimiento del espesor  $d$  de la capa solidificada:

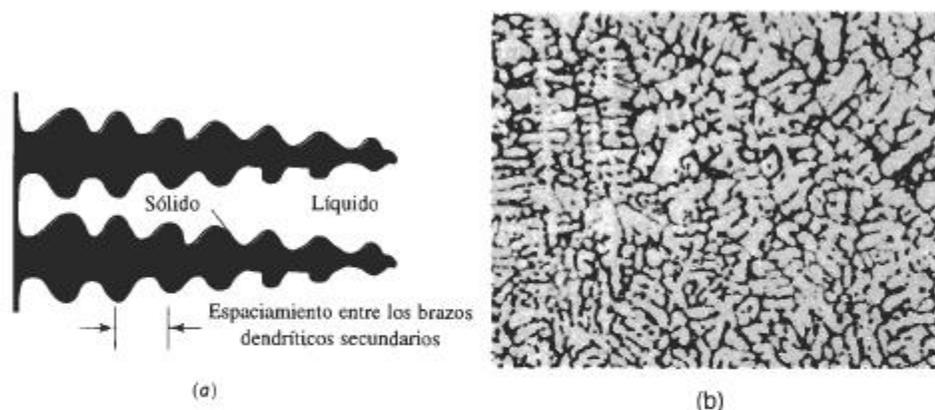
$$d = k\sqrt{t} - c, \quad (8-5)$$

donde  $t$  es el tiempo después del colado,  $k$  es una constante para un material de fundición y molde dados, y  $c$  es una constante relacionada con la temperatura del colado.

**Efecto en la estructura y las propiedades** El tiempo de solidificación afecta el tamaño de las dendritas. Normalmente, el tamaño de la dendrita se representa midiendo la distancia entre los brazos dendríticos secundarios (figura 8-6). El **espaciamento entre brazos dendríticos secundarios**, EBDS, se reduce cuando la fundición se solidifica con mayor rapidez. Las redes dendríticas más finas y más extensas sirven como un conductor más eficiente del calor latente hacia el líquido subenfriado. El EBDS está relacionado con el tiempo de solidificación por la relación:

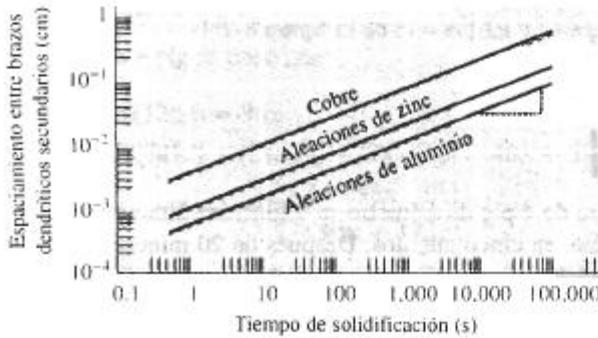
$$EBDS = kt^m, \quad (8-6)$$

donde  $m$  y  $k$  son constantes que dependen de la composición del metal. Esta relación se muestra en la figura 8-7 para varias aleaciones. Espaciamentos pequeños entre los brazos dendríticos secundarios producen mayor resistencia mecánica y mejor ductilidad (figura 8-8).

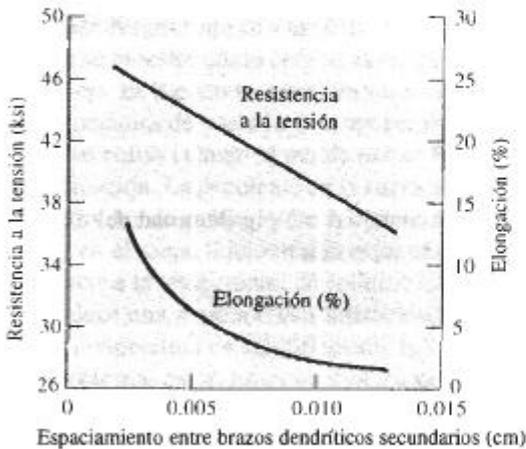


**FIGURA 8-6** (a) El espaciamento entre los brazos dendríticos secundarios (EBDS). (b) Dendritas en una aleación de aluminio ( $\times 50$ ). (De Metals Handbook, Vol. 9, 9a edición, American Society for Metals, 1985.)

Para producir espaciamentos entre brazos dendríticos secundarios excepcionalmente finos se utiliza un proceso de solidificación rápida; un método común es producir gotas de líquido muy finas mediante procesos especiales de atomización. Las gotas pequeñas se solidifican a una rapidez de aproximadamente  $10^4$  °C/s. Esta velocidad de enfriamiento no es suficientemente rápida para formar un vidrio metálico, pero sí produce una estructura dendrítica fina. Consolidando cuidadosamente las gotitas de sólido mediante procesos de metalurgia de polvos, se pueden obtener propiedades mejoradas del material.



**FIGURA 8-7** Efecto del tiempo de solidificación en el espaciamiento entre los brazos dendríticos secundarios de cobre, zinc y aluminio.



**FIGURA 8-8** Efecto del espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios sobre las propiedades de una aleación de aluminio para fundición.

**EJEMPLO 8-3**

Determine las constantes en la ecuación que describe la relación de espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios y el tiempo de solidificación para aleaciones de aluminio (figura 8-7).

**SOLUCIÓN**

Se puede leer el valor de EBDS en dos puntos de la gráfica y calcular  $k$  y  $m$  utilizando ecuaciones simultáneas. Sin embargo, si las escalas en la ordenada y abscisa son iguales para potencias de diez (como en la figura 8-7), se puede obtener el valor de  $m$  de la línea en la gráfica log-log midiendo la pendiente directamente. En la figura 8-7, la escala vertical tiene marcadas cinco unidades iguales y la horizontal 12. La pendiente es:

$$m = \frac{5}{12} = 0.42$$

La constante  $k$  es el valor de EBDS cuando  $t_s = 1$ , ya que:

$$\log \text{EBDS} = \log k + m \log t_s$$

Si  $t_s = 1$ ,  $m \log t_s = 0$ , y  $EBDS = k$ , de la figura 8-7:

$$k = 8 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

#### EJEMPLO 8-4

Una barra de aluminio de 4 plg de diámetro se solidifica hasta una profundidad de 0.5 plg por debajo de la superficie, en cinco minutos. Después de 20 minutos, la barra se ha solidificado hasta una profundidad de 1.5 plg. ¿Cuánto tiempo más se requiere para que la barra se solidifique totalmente?

#### SOLUCIÓN

De nuestras mediciones, podemos determinar las constantes  $k$  y  $c$  de la ecuación 8-5:

$$0.5 \text{ in.} = k\sqrt{(5 \text{ min})} - c \quad \text{o} \quad c = k\sqrt{5} - 0.5$$

$$1.5 \text{ in.} = k\sqrt{(20 \text{ min})} - c = k\sqrt{20} - (k\sqrt{5} - 0.5)$$

$$1.5 = k(\sqrt{20} - \sqrt{5}) + 0.5$$

$$k = \frac{1.5 - 0.5}{4.472 - 2.236} = 0.447$$

$$c = (0.447)\sqrt{5} - 0.5 = 0.4995$$

La solidificación será completa cuando  $d = 2$  plg (la mitad del diámetro, ya que la solidificación está ocurriendo desde toda la superficie):

$$2 = 0.447\sqrt{t} - 0.4995$$

$$\sqrt{t} = \frac{2 + 0.4995}{0.447} = 5.59$$

$$t = 31.27 \text{ min}$$

En la realidad, se encontraría que el tiempo total de solidificación es algo mayor a 31.27 minutos. Conforme la solidificación continúa, se va calentando el molde y es menos eficaz para eliminar el calor de la pieza.

#### EJEMPLO 8-5

#### Diseño de una fundición de aluminio

Diseñe el espesor de una fundición de aluminio cuya longitud es de 12 plg y su ancho 8 plg, a fin de producir una resistencia a la tensión de 40,000 psi. La constante del molde en la regla de Chvorinov para aleaciones de aluminio coladas en molde de arena, es de 45 min/plg<sup>2</sup>.

#### SOLUCIÓN

A fin de obtener una resistencia a la tensión de 42,000 psi, se requiere un espaciado entre brazos dendríticos secundarios de aproximadamente 0.007 cm (figura 8-8). De la figura 8-7, podemos determinar que el tiempo de solidificación requerido para obtener este espaciado es de aproximadamente 300 segundos, es decir 5 minutos. De la regla de Chvorinov:

$$t_s = B \left( \frac{V}{A} \right)^2,$$

donde  $B = 45 \text{ min/plg}^2$  y  $x$  es el espesor de la fundición. Dado que la longitud es de 12 plg y el ancho es de 8 plg se tiene que:

$$V = (8)(12)(x) = 96x$$

$$A = (2)(8)(12) + (2)(x)(8) + (2)(x)(12) = 40x + 192$$

$$5 \text{ min} = (45 \text{ min/plg}^2) \left( \frac{96x}{40x + 192} \right)^2$$

$$\frac{96x}{40x + 192} = \sqrt{(5/45)} = 0.333$$

$$96x = 13.33x + 63.9$$

$$x = 0.77 \text{ plg}$$

## 8-5 Curvas de enfriamiento

Podemos resumir nuestro análisis hasta este punto, examinando una curva de enfriamiento, en la cual se muestra cómo cambia la temperatura de un material con el transcurso del tiempo (figura 8-9). El líquido se vierte en un molde a la **temperatura de vaciado**. La diferencia entre la temperatura de vaciado y la temperatura de solidificación es el **sobrecalentamiento**. El líquido se enfría cuando el molde extrae su calor específico, hasta que llega a la temperatura de solidificación. La pendiente de la curva de enfriamiento, antes de que se inicie la solidificación, es la *rapidez de enfriamiento*  $\Delta T/\Delta t$ .

Si en el metal líquido están presentes núcleos heterogéneos efectivos, el cambio de estado comienza a la temperatura de solidificación. Debido a la generación del calor latente de fusión se produce una meseta o **estabilización térmica**. El calor latente mantendrá el líquido restante a la temperatura de solidificación, hasta que todo el líquido se haya solidificado y no se pueda extraer más calor. En estas condiciones el crecimiento es planar. El **tiempo de solidificación total** de la fundición es el tiempo requerido para eliminar tanto el calor específico del líquido sobrecalentado como el calor latente de fusión y se mide a partir del momento del vaciado, hasta que se completa la solidificación; este tiempo se determina por la regla de Chvorinov. El **tiempo de solidificación local** es el requerido para eliminar sólo el calor latente de fusión en algún sitio particular de la fundición, y se mide a partir del momento en que comienza la solidificación hasta que ésta termina.

## 8-6 Fundición o estructura de lingote

Los metales fundidos se vacían en moldes, dejando que se solidifiquen. A menudo el molde produce un producto terminado o fundición. En otros casos, el molde produce una forma simple, llamada **lingote**, el cual requiere una deformación plástica o maquinado antes de crear un producto terminado. En el segundo caso se produce una **macroestructura**, que a veces se conoce como **estructura de lingote**, la cual está formada de hasta tres partes (figura 8-10).

**Zona templada** La **zona templada** es una estrecha banda de granos, orientados al azar y localizada sobre la superficie de la pieza. El metal que está sobre la pared del molde es el primero en enfriarse a una temperatura igual a la temperatura de solidificación. La pared del molde también tiene muchos puntos de contacto en los cuales puede ocurrir la nucleación heterogénea.

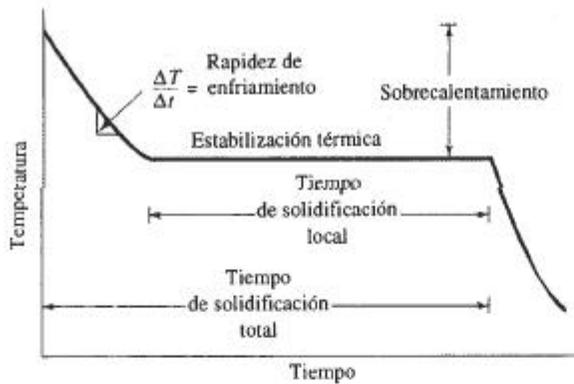


FIGURA 8-9 Curva de enfriamiento para la solidificación de un material puro.

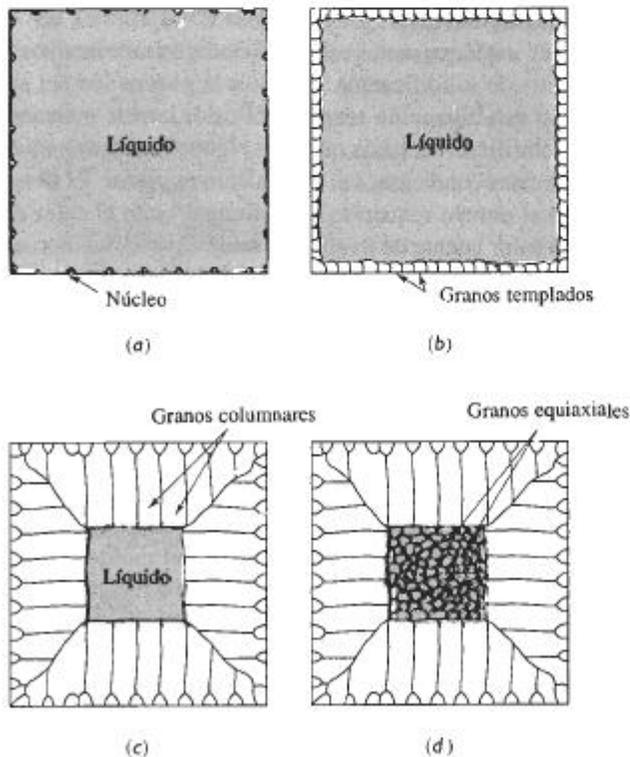
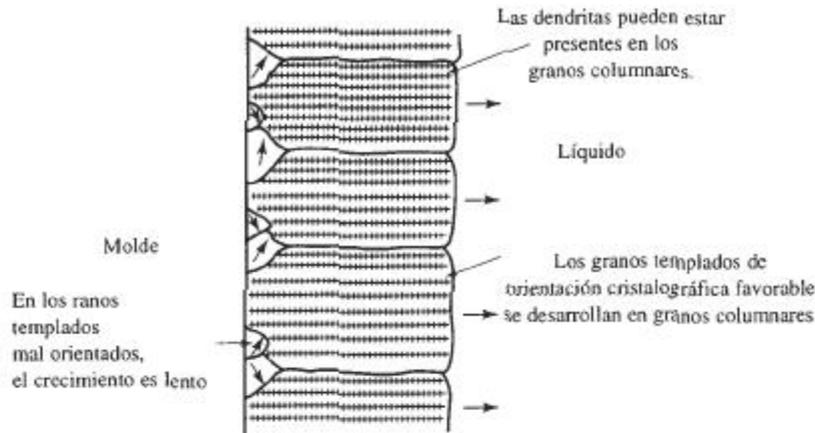


FIGURA 8-10 Desarrollo de la macroestructura de una fundición durante la solidificación: (a) Se inicia la nucleación, (b) se forma la zona templada, (c) un crecimiento preferencial produce la zona columnar y (d) la nucleación adicional crea la zona equiaxial.



**FIGURA 8-11** La competencia en el crecimiento de los granos de la zona templada da como resultado que sólo aquellos granos con orientaciones favorables se desarrollen en granos columnares.

**Zona columnar** La **zona columnar** contiene granos alargados, orientados en una dirección cristalográfica particular. Conforme el material del molde extrae calor de la fundición, los granos de la zona fría crecen en dirección opuesta al flujo de calor o desde las áreas más frías de la pieza a las más calientes. Esta tendencia por lo general significa que los granos crecerán perpendicularmente a la pared del molde.

Los granos crecen más rápidamente en ciertas direcciones cristalográficas. En los metales que tienen una estructura cristalina cúbica, los granos de la zona fría con una dirección  $\langle 100 \rangle$  perpendicular a la pared del molde crecerán más aprisa que los granos orientados en otras direcciones cristalográficas (figura 8-11). Finalmente, los granos en la zona columnar tendrán direcciones  $\langle 100 \rangle$  paralelas entre sí, repercutiendo en propiedades anisotrópicas en esta zona.

La formación de la zona columnar queda determinada principalmente por los fenómenos de crecimiento y no por los de nucleación. Los granos pueden estar compuestos de muchas dendritas si originalmente el líquido está subenfriado. Si no hay subenfriamiento, los granos columnares pueden crecer en forma planar al avanzar la solidificación.

**Zona equiaxial** Aunque el sólido puede continuar creciendo de manera columnar hasta transformarse todo el líquido, frecuentemente en el centro de la fundición o lingote se forma una zona de granos equiaxiales. La **zona equiaxial** contiene granos nuevos, orientados al azar. A menudo estos granos se generan por una baja temperatura de vaciado o por la incorporación de elementos aleantes, refinadores de grano e inoculantes. Estos granos crecen en forma relativamente redonda o equiaxial, con orientación cristalográfica aleatoria y deteniendo el crecimiento de los granos columnares. La formación de la zona equiaxial es un proceso controlado por la nucleación, y hace que esta porción de la fundición presente comportamiento isotrópico.

## 8-7 Solidificación de los polímeros

La solidificación de los polímeros es significativamente distinta a la de los metales y requiere que largas cadenas de moléculas se alineen muy cerca unas de otras a lo largo de distancias relati-

vamente largas. Al hacerlo, el polímero crece como cristales en forma de lámina (figura 8-12). La región entre cada una de las láminas contiene cadenas de polímeros distribuidas en forma aleatoria.

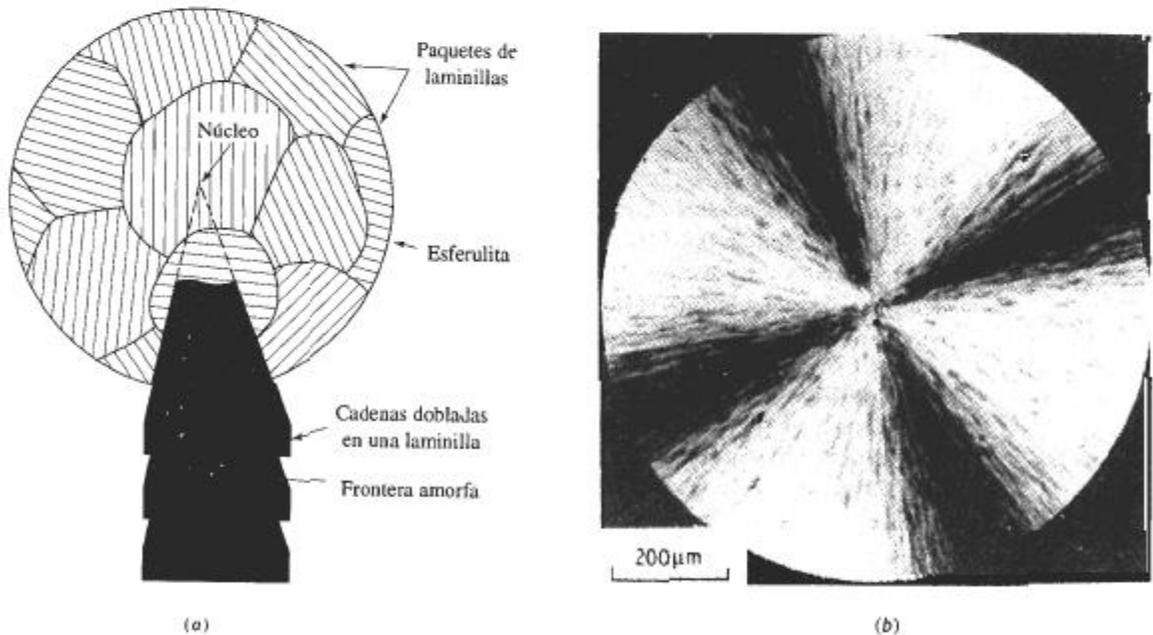
Además, a partir de un núcleo común crecen agrupamientos de láminas, aunque la orientación de éstas difiere de un agrupamiento a otro. Conforme estos agrupamientos crecen, pueden tener una forma esferoidal que se conoce como **esferulita**. La esfera está compuesta por muchos agrupamientos individuales de láminas o laminillas con orientación diferente.

Muchos polímeros no se cristalizan al ser enfriados. La velocidad de nucleación del sólido puede ser demasiado lenta o la complejidad de las cadenas poliméricas puede ser tan grande, que no se forma un sólido cristalino. Incluso cuando ocurre la solidificación, la cristalización en los polímeros nunca es completa; quedan presentes regiones amorfas entre laminillas individuales, entre agrupamientos de laminillas, y entre esferulitas.

## 8-8 Defectos de solidificación

Aunque existen muchos defectos que pudieran generarse durante la solidificación, dos merecen mención especial.

**Contracción** La mayoría de los materiales son más densos en estado sólido que en estado líquido. Durante la solidificación el material se contrae, es decir, se encoge hasta un 7 por ciento (tabla 8-2). Frecuentemente, la mayor parte de la **contracción** produce **cavidades**, si la solidificación se inicia en toda la superficie de la pieza. Si una de las superficies se solidifica más lentamente que las demás, la contracción aparece en forma de **rechupe** (figura 8-13).

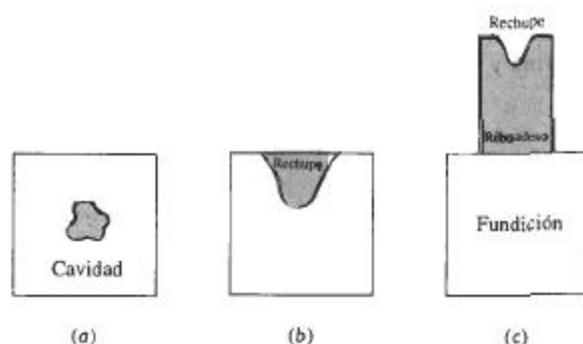


**FIGURA 8-12** (a) Estructura de una esferulita en polímeros: la esferulita está formada por agrupamientos de laminillas, cada una de ellas es un cristal individual. Las laminillas contienen cadenas de polímeros ordenados en una estructura cristalina. Una región límite amorfa separa dichas laminillas. (b) Esferulita en el poliestireno ( $\times 8000$ ). (De R. Young y P. Lovell, *Introduction to Polymers*, 2a edición, Chapman & Hall, 1991.)

**TABLA 8-2** Contracción durante la solidificación de algunos materiales seleccionados

Material	Contracción (%)
Al	7.0
Cu	5.1
Mg	4.0
Zn	3.7
Fe	3.4
Pb	2.7
Ga	+ 3.2 (expansión)
H <sub>2</sub> O	+ 8.3 (expansión)

Una técnica común para controlar cavidades y rechupes por la contracción volumétrica es colocar un **rebosadero**, es decir, una reserva de metal conectada a la fundición. Conforme el metal se solidifica y se contrae, fluye metal líquido del rebosadero hacia la fundición, para llenar el hueco dejado por la contracción. Sólo es necesario asegurarse que el rebosadero solidifique después de la fundición, y que exista un camino o canal líquido interno que conecte el líquido del rebosadero con el último líquido a solidificar en la pieza. Se puede utilizar la regla de Chvorinov en el diseño del tamaño del rebosadero.

**FIGURA 8-13** Pueden ocurrir varios tipos de macrocontracción mediante la solidificación, incluyendo cavidades y rechupes. Se pueden utilizar rebosaderos para compensar la contracción volumétrica.**EJEMPLO 8-6****Diseño de un rebosadero**

Diseñe un rebosadero cilíndrico, con una altura igual a dos veces su diámetro, que compense la contracción en una fundición de  $2 \times 8 \times 16$  cm (figura 8-14).

**SOLUCIÓN**

Se sabe que el rebosadero debe solidificarse después de la fundición. Si se desea ser conservador, típicamente se requerirá que la mazarota tarde un 25% más en solidificar que la fundición. Por tanto:

$$t_{\text{rebosadero}} = 1.25t_{\text{fundición}} \quad \text{o} \quad B\left(\frac{V}{A}\right)_r = 1.25B\left(\frac{V}{A}\right)_c$$

La constante del molde  $B$  es la misma tanto para la fundición como para el rebosadero, por lo que:

$$\left(\frac{V}{A}\right)_r = \sqrt{1.25\left(\frac{V}{A}\right)_c}$$

$$V_c = (2)(8)(16) = 256 \text{ cm}^3$$

$$A_c = (2)(2)(8) + (2)(2)(16) + (2)(8)(16) = 352 \text{ cm}^2$$

Podemos escribir las ecuaciones para el volumen y área del rebosadero cilíndrico, observando que  $H = 2D$ :

$$V_r = (\pi/4)D^2H = (\pi/4)D^2(2D) = (\pi/2)D^3$$

$$A_r = 2(\pi/4)D^2 + \pi DH \approx 2(\pi/4)D^2 + \pi D(2D) = (5\pi/2)D^2$$

$$\frac{V_r}{A_r} = \frac{(\pi/2)(D)^3}{(5\pi/2)(D)^2} = \frac{D}{5} > \sqrt{\frac{(1.25)(256)}{352}}$$

$$D = 4.77 \text{ cm} \quad H = 2D = 9.54 \text{ cm} \quad V_r = 170.5 \text{ cm}^3$$

Aunque el volumen del rebosadero es menor que el de la pieza fundida, el rebosadero se solidifica más lentamente, debido a su forma compacta. ■

**La contracción interdendrítica** consiste en la formación de poros debido a contracciones volumétricas entre las dendritas (figura 8-15). Este defecto, también conocido como *microcontracción* o *porosidad por contracción*, es difícil de evitar mediante rebosaderos, las altas velocidades de enfriamiento pueden reducir los problemas de la contracción interdendrítica; las dendritas pueden reducirse en su longitud, permitiendo que el líquido fluya a través de la red dendrítica hacia la interfase del frente de solidificación. Además, cualquier contracción remanente puede hacerse más fina y más uniformemente distribuida.

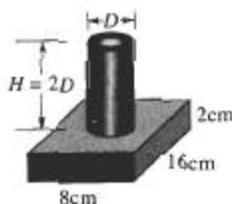
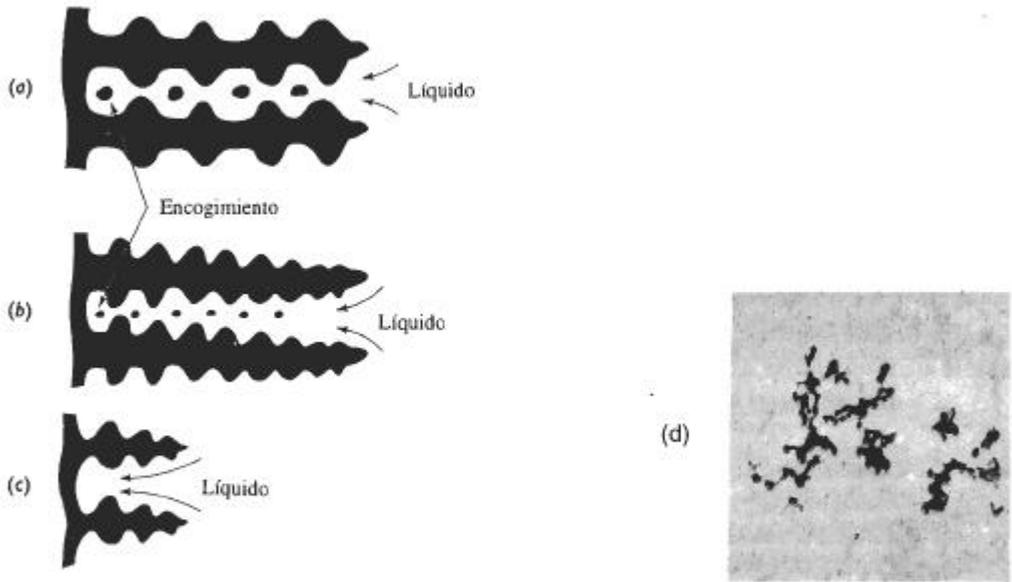


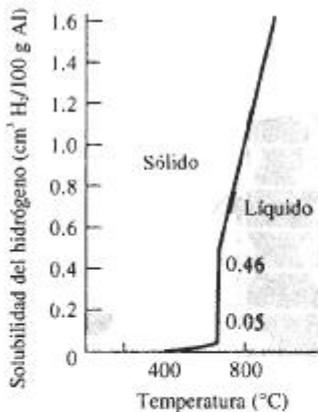
FIGURA 8-14 Geometría de la pieza y su rebosadero (para el ejemplo 8-6).

**Porosidad gaseosa** Muchos metales en estado líquido disuelven gran cantidad de gas. Por ejemplo, el aluminio líquido permite la incorporación de hidrógeno en solución. Sin embargo, al solidificarse, el aluminio sólo puede retener en su estructura una pequeña fracción del gas (figura 8-16). El hidrógeno excedente forma burbujas que pueden quedar atrapadas en el metal sólido, produciendo **porosidad gaseosa**. La cantidad de gas que se puede disolver en un metal fundido está dada por la **ley de Sievert**:

$$\text{Porcentaje de gas} = K\sqrt{p_{\text{gas}}}, \quad (8-7)$$

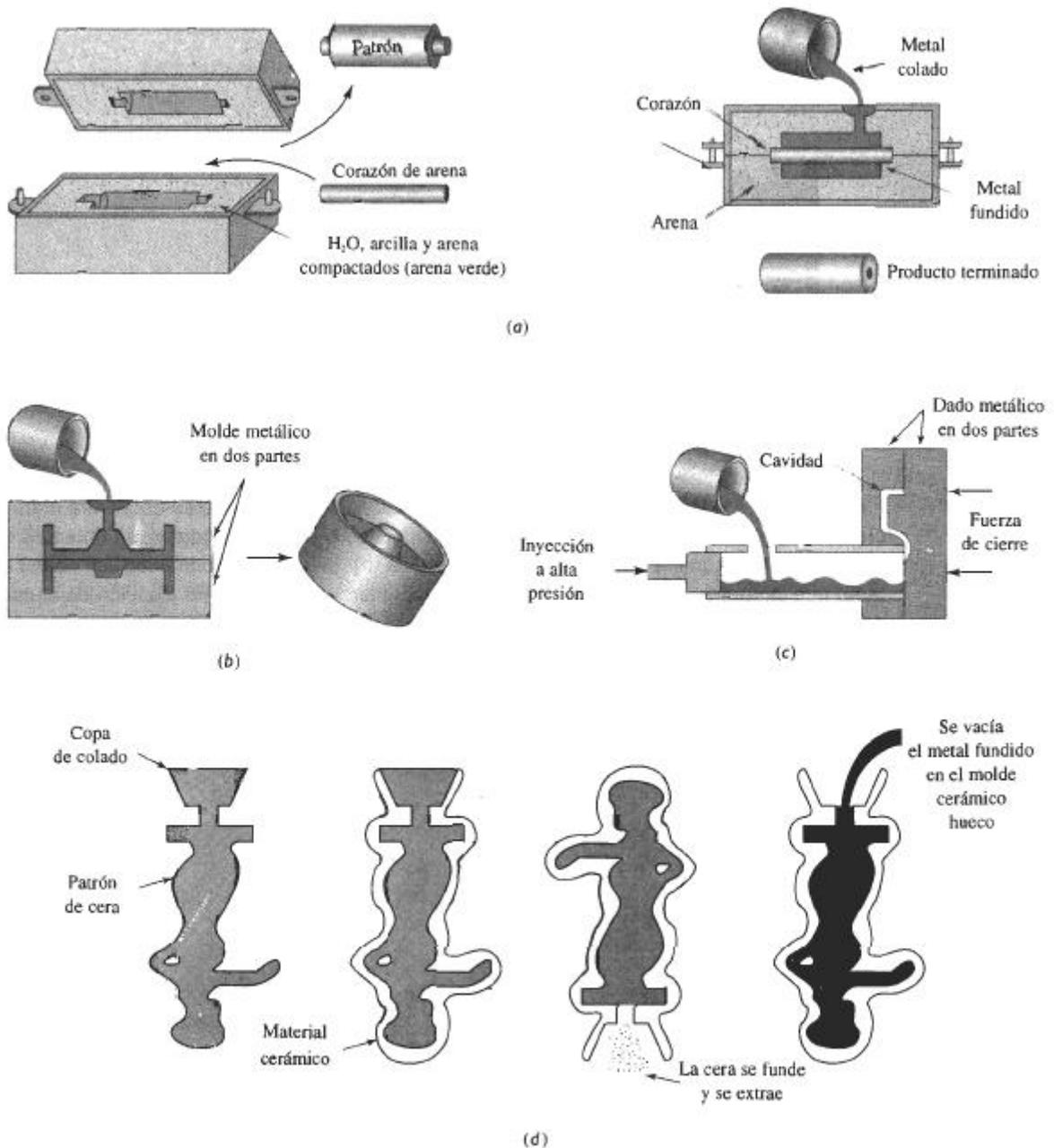


**FIGURA 8-15** (a) Puede ocurrir contracción volumétrica del líquido que se encuentra entre los brazos dendríticos. A menor espaciamento entre los brazos de las dendritas, se obtendrá una porosidad más pequeña y uniformemente distribuida (b). Si los brazos primarios son cortos evitarán que la contracción ocurra (c). La contracción interdendrítica en una aleación de aluminio se muestra en (d) ( $\times 80$ ).



**FIGURA 8-16** Solubilidad del hidrógeno en aluminio cuando la presión parcial de  $H_2 = 1$  atmósfera.

donde  $p_{gas}$  es la presión parcial del gas en contacto con el metal y  $K$  es una constante específica para un sistema metal-gas particular, que aumenta con el incremento de temperatura. Se puede minimizar la porosidad del gas en fundiciones manteniendo baja la temperatura del líquido; agregando materiales al líquido para que se combinen con dicho gas formando un sólido, o asegurándose de mantener baja la presión parcial de dicho gas. Esto último se puede conseguir colocando el metal fundido en una cámara de vacío, o haciendo pasar burbujas de gas inerte a través de dicho metal. Dado que  $p_{gas}$  tiene un valor bajo cuando el metal líquido se somete a vacío o a burbujeo, el gas disuelto abandonará el metal, y se introducirá en el sistema que genera el vacío o en las burbujas de gas inerte.



**FIGURA 8-17** Cuatro procesos de fundición típicos: (a) Moldeo en arena verde, en el cual se compacta arena arcillosa alrededor de un patrón. Los corazones de arena pueden producir cavidades internas en la fundición. (b) El proceso de colado en molde permanente, en el cual se vacía el metal líquido en un molde de hierro o de acero. (c) Proceso de inyección a presión, en el cual se inyecta el metal a alta presión en un molde de acero. (d) Proceso de moldeo por revestimiento o a la cera perdida, en el cual un patrón de cera es recubierto por un producto cerámico; después se funde la cera y se extrae para posteriormente verter el metal dentro del molde.

**EJEMPLO 8-7** Diseño de un proceso de degasificación

Después de fundirse a la presión atmosférica, el cobre contiene en su peso 0.01% de oxígeno. Para asegurarse de que las piezas de fundición no tengan porosidad gaseosa, se desea reducir el porcentaje a menos de 0.00001% antes del vaciado. Diseñe un proceso de degasificación para el cobre.

**SOLUCIÓN**

Se puede resolver este problema de varias maneras. En una de ellas, el cobre líquido se coloca en una cámara de vacío; el oxígeno es entonces extraído del líquido y arrastrado hacia el sistema de vacío. El vacío que se requiere puede estimarse a partir de la ley de Sievert:

$$\frac{\%O_{\text{inicial}}}{\%O_{\text{vacío}}} = \frac{K\sqrt{p_{\text{inicial}}}}{K\sqrt{p_{\text{vacío}}}} = \sqrt{\left(\frac{1}{p_{\text{vacío}}}\right)}$$

$$\frac{0.01\%}{0.00001\%} = \sqrt{\left(\frac{1}{p_{\text{vacío}}}\right)}$$

$$\frac{1}{p_{\text{vacío}}} = (1000)^2 \quad \text{o} \quad p_{\text{vacío}} = 10^{-6} \text{ atm}$$

Otro procedimiento sería introducir una aleación de cobre al 15% de fósforo. El fósforo reacciona con el oxígeno para producir  $P_2O_5$ , que flota sobre el líquido, mediante la reacción:



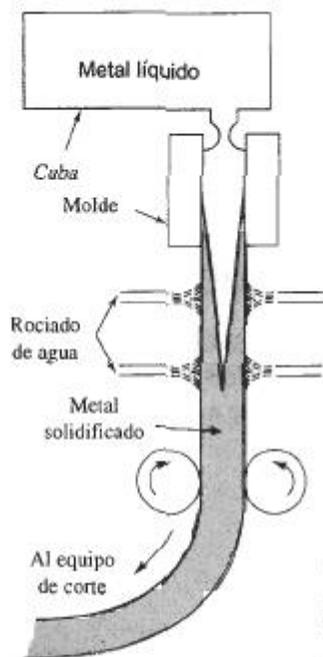
Generalmente debe agregarse de 0.01 a 0.02% P para eliminar el oxígeno. ■

**8-9** Procesos de fundición

La figura 8-17 resume cuatro de las docenas de procesos de fundición comerciales. Los procesos de moldeado en arena incluyen moldeado con arena verde, en el cual los granos de arena sílica ( $SiO_2$ ) unidos con arcilla húmeda, se compactan alrededor de un patrón removible. Los procesos de colado en molde cerámico utilizan un material cerámico de grano fino para fabricar el molde en forma de pasta espesa que se vierte alrededor de un patrón reutilizable, el cual es retirado cuando el material cerámico se endurece. En la fundición por revestimiento o a la cera perdida, la pasta cerámica recubre un patrón de cera. Una vez que el molde se seca y se endurece, se funde la cera y se saca de la carcasa cerámica, dejando en su sitio una cavidad, que será llenada con metal fundido.

En los procesos de molde permanente y de fundición a presión, se maquina en metal una cavidad. Una vez que el líquido vertido se solidifica en la cavidad, se abre el molde, se quita la pieza y se vuelve a utilizar dicho molde. Estos procesos tienden a proporcionar las fundiciones de la más alta resistencia, en razón de su rápida solidificación. Los moldes cerámicos, incluyendo los que se utilizan en el procedimiento de revestimiento o a la cera perdida son buenos aislantes, y dan piezas fundidas de enfriamiento más lento y de más baja resistencia mecánica.

**Colada continua** También se pueden producir perfiles metálicos continuos mediante el proceso de colado o fundición. La figura 8-18 muestra un método común para la producción de placas y barras de acero. El metal líquido es alimentado desde un recipiente hacia un molde de



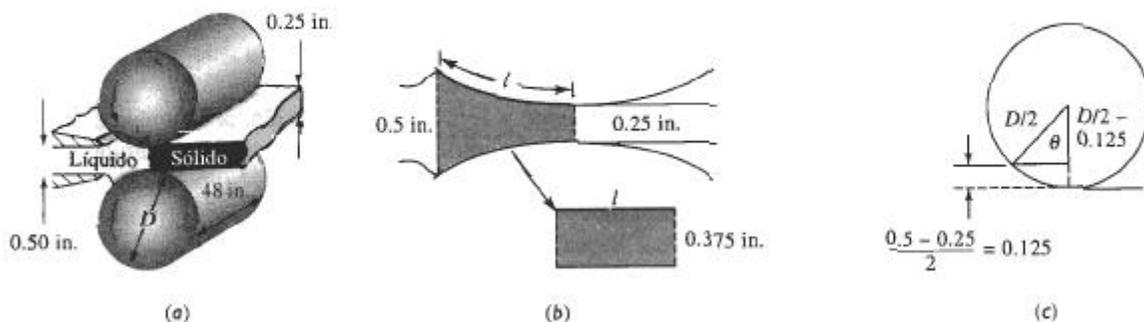
**FIGURA 8-18** Colada continua vertical, típica en la producción de muchos productos de acero. El metal líquido contenido en la cuba se vacía y solidifica parcialmente en un molde de cobre.

cobre enfriado por agua, que enfría rápidamente la superficie del acero. El acero parcialmente solidificado es extraído del molde a la misma velocidad que otra porción de acero líquido al entrar en dicho molde. El centro del perfil de acero termina su solidificación fuera del molde. La tira de material continuo se corta a las longitudes apropiadas mediante máquinas de corte especiales que viajan a la misma velocidad que la cinta de acero. Se utilizan procedimientos similares para obtener perfiles o listones de aluminio, cobre e incluso vidrios cerámicos.

### EJEMPLO 8-8

### Diseño de una máquina de colada continua

La figura 8-19 muestra un método para la colada continua de una placa de aluminio de 0.25 plg de espesor y 48 plg de ancho, que será laminada en hojas. El aluminio líquido se introdu-



**FIGURA 8-19** Colada continua horizontal del aluminio (para el ejemplo 8-8).

ce entre dos rodillos grandes de acero que giran lentamente. Se desea que este metal termine su solidificación justo al salir del par de rodillos. Los rodillos actúan como molde permanente, con una constante de molde  $B$  de aproximadamente  $5 \text{ min/plg}^2$ , cuando se vacía aluminio con un sobrecalentamiento adecuado. Diseñe los rodillos requeridos para este proceso.

### SOLUCIÓN

Sería útil simplificar la geometría, de manera que pudiéramos determinar un tiempo de solidificación para la fundición. Supongamos que el área sombreada en la figura 8-19(b) representa la "fundición" y que se puede expresar como el espesor promedio multiplicado por una longitud y un ancho. El espesor promedio es  $(0.50 \text{ plg} + 0.25 \text{ plg})/2 = 0.375 \text{ plg}$ . Entonces:

$$\begin{aligned} V &= (\text{espesor})(\text{longitud})(\text{ancho}) = 0.375lw \\ A &= 2(\text{longitud})(\text{ancho}) = 2lw \\ \frac{V}{A} &= \frac{0.375lw}{2lw} = 0.1875 \end{aligned}$$

En la regla de Chvorinov se utilizará sólo el área directamente en contacto con los rodillos, ya que de otras superficies no se transfiere nada o prácticamente nada de calor. El tiempo de solidificación debería ser:

$$t_s = B \left( \frac{V}{A} \right)^2 = (5)(0.1875)^2 = 0.175 \text{ min}$$

Para que la placa se mantenga en contacto con los rodillos durante este tiempo, se deberá diseñar el diámetro de los rodillos y su velocidad de rotación. La figura 8-19(c) muestra que el ángulo  $\theta$  entre los puntos en los cuales el líquido entra y sale de los rodillos es:

$$\cos \theta = \frac{(D/2) - 0.125}{(D/2)} = \frac{D - 0.0625}{D}$$

La velocidad de la superficie de los rodillos es el producto de la circunferencia y la velocidad angular de los mismos,  $v = \pi DR$ , estando  $R$  en revoluciones/minuto. La velocidad  $v$  también es la rapidez a la cual podemos producir la placa de aluminio. El tiempo requerido para que los rodillos recorran la distancia  $l$  deberá ser igual al tiempo requerido de solidificación.

$$t = \frac{l}{v} = 0.175 \text{ min}$$

La longitud  $l$  es la fracción del diámetro del rodillo que está en contacto con el aluminio durante la solidificación y ésta está dada por:

$$l = \frac{\pi D \theta}{360}$$

Entonces, sustituyendo  $l$  y  $v$  en la ecuación correspondiente al tiempo:

$$\begin{aligned} t &= \frac{l}{v} = \frac{\pi D \theta}{360 \pi DR} = \frac{\theta}{360R} = 0.175 \\ R &= \frac{\theta}{(360)(0.175)} = 0.0159\theta \end{aligned}$$

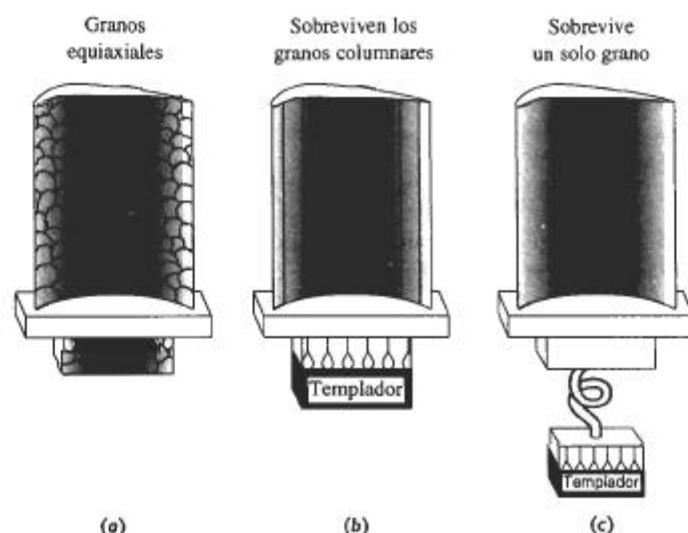
Existe una diversidad de combinaciones de  $D$  y de  $R$  que dan la velocidad de solidificación requerida. Calculemos  $\theta$  para varios diámetros y a continuación determinemos la  $R$  requerida.

$D$	$\theta$	$l$	$R = 0.01590$	$v = \pi DR$
24 plg	4.1359	0.866 plg	0.066 rev/min	4.98 plg/min
36 plg	3.3767	1.061 plg	0.054 rev/min	6.11 plg/min
48 plg	2.9242	1.225 plg	0.047 rev/min	7.09 plg/min
60 plg	2.6154	1.369 plg	0.042 rev/min	7.92 plg/min

Conforme se incrementa el diámetro de los rodillos, aumenta también el área de contacto ( $l$ ) entre rodillos y metal. Esto, a su vez, da lugar a la posibilidad de una velocidad superficial más rápida ( $v$ ) de los rodillos, incrementándose la velocidad de producción de placa. Sin embargo, los rodillos del diámetro mayor no necesitan girar tan rápidamente para obtener estas velocidades.

Al seleccionar nuestro diseño final, preferiremos utilizar el mayor diámetro de rodillo práctico para asegurar grandes velocidades de producción. Sin embargo, conforme los rodillos son de mayor diámetro, éstos y su equipo de soporte se hacen también más costosos.

En la operación real del proceso de colada continua se podrían utilizar velocidades más rápidas, ya que la placa no requiere que esté totalmente solidificada en el momento de salir de los rodillos.



**FIGURA 8-20** Control de la estructura granular en los álabes de turbina: (a) Granos equiaxiales convencionales, (b) granos columnares solidificados direccionalmente, y (c) monocristal.

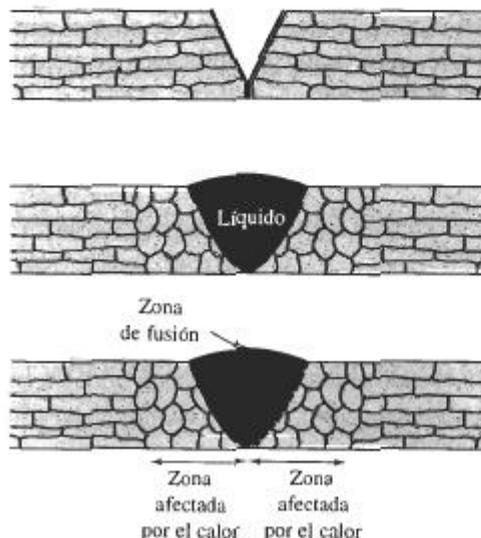
**Solidificación direccional** Existen algunas aplicaciones donde no es deseable tener una estructura de granos equiaxiales en la pieza. Las fundiciones que se utilizan para las aspas y los álabes de los motores de turbina son un ejemplo (figura 8-20). Estas piezas de fundición a menudo se fabrican a partir de superaleaciones de cobalto o de níquel por fundición a la cera perdida.

En las piezas fundidas convencionalmente, se produce una estructura de granos equiaxiales. Sin embargo, las aspas y los álabes para motores de turbina y de reacción fallan a lo largo de los bordes de grano transversales. Se obtienen mejores resistencias a la termofluencia y a la fractura, utilizando la técnica de solidificación direccional (SD). En el proceso SD, se calienta el molde desde un extremo y se enfría desde otro, produciendo una microestructura columnar que tiene todos los bordes de grano en la dirección longitudinal de la pieza. No existen bordes de grano en la dirección transversal [figura 8-20(b)].

Aún mejores propiedades pueden obtenerse utilizando una técnica de monocristal. De nuevo la solidificación comienza en forma de granos columnares en una superficie fría; sin embargo, debido a la conexión helicoidal, solamente un grano columnar puede crecer en el cuerpo principal de la pieza [figura 8-20(c)]. La pieza de un solo cristal no tiene absolutamente ningún borde de grano y tiene sus planos y direcciones cristalográficas en orientación óptima.

## 8-10 Solidificación y unión de los metales

La solidificación también es importante en la unión de los metales mediante la **soldadura por fusión**. En los procesos de soldadura por fusión, una porción de los metales a unir se funde y, en muchos casos, se agrega un metal fundido adicional. La zona donde se tiene metal líquido se conoce como **zona de fusión** (figura 8-21). Cuando posteriormente la zona de fusión solidifica, las piezas originales de metal quedan unidas entre sí.



**FIGURA 8-21** Diagrama esquemático de la zona de fusión y de la solidificación durante la soldadura por fusión: (a) Unión preparada para la soldadura, (b) soldadura a su temperatura máxima, con la unión llena de metal de aporte en estado líquido y (c) soldadura después de la solidificación.

Durante la solidificación de la zona de fusión, no se requiere nucleación. El sólido simplemente empieza a crecer en forma columnar a partir de granos existentes. El crecimiento de los granos sólidos en la zona de fusión a partir de granos preexistentes se conoce como **crecimiento epitaxial**.

La estructura y las propiedades de la zona de fusión dependen de muchas de las mismas variables involucradas en los procesos de fundición de metales. La adición de agentes inoculantes a la zona de fusión reduce el tamaño de grano. Velocidades rápidas de enfriamiento o tiempos cortos de solidificación promueven una microestructura más fina y mejores propiedades. Los factores que incrementan la velocidad de enfriamiento son un mayor espesor del material; zonas de fusión más pequeñas; temperatura inicial del metal baja y ciertos procesos de soldadura. Por ejemplo, la soldadura oxiacetilénica utiliza flamas de relativamente baja intensidad; en consecuencia, los tiempos de soldadura son largos y el metal sólido circundante, que se pone muy caliente, no es un enfriador térmico efectivo. Pero los procesos de soldadura por arco proporcionan una fuente de calor más intensa, minimizando así el calentamiento del metal circundante y proporcionando un enfriamiento más rápido. Las soldadoras láser y de haz de electrones son fuentes excepcionalmente intensas de calor; producen velocidades muy rápidas de enfriamiento y soldaduras potencialmente resistentes.

## RESUMEN

Una de las primeras oportunidades de controlar la estructura y propiedades mecánicas de un material ocurre durante su solidificación. Podemos controlar el tamaño y la forma de los granos para mejorar sus propiedades generales; para obtener propiedades uniformes o, si así lo deseamos, para obtener un comportamiento anisotrópico. Estos objetivos se cumplen al controlar la nucleación y el crecimiento del material sólido a partir de su estado líquido.

- La nucleación produce una partícula sólida de tamaño crítico a partir de la fundición líquida.
  - La nucleación homogénea requiere grandes subenfriamientos del líquido y no es común en el procesamiento normal de solidificación.
  - Introduciendo partículas extrañas en el líquido, se disponen de núcleos para una nucleación heterogénea. En la práctica, mediante la inoculación o la refinación de grano, este proceso permite controlar el tamaño de grano de la fundición.
  - El enfriamiento rápido del líquido puede impedir tanto la nucleación como el crecimiento, resultando en sólidos amorfos, es decir vítreos, con propiedades mecánicas y físicas fuera de lo común.
- El crecimiento ocurre conforme los núcleos crecen en la fundición líquida. Puede ocurrir crecimiento planar o crecimiento dendrítico.
  - En el crecimiento planar, crecerá una interfase lisa o plana sólida-líquida con poco o ningún subenfriamiento del líquido. Algunos procesos de solidificación direccionada especiales aprovechan el crecimiento planar.
  - El crecimiento dendrítico ocurre cuando el líquido está subenfriado. Un enfriamiento rápido o un tiempo de solidificación breve, produce una estructura dendrítica más fina y a menudo consigue propiedades mecánicas mejoradas.
- La regla de Chvorinov,  $t_f = B(V/A)^2$ , puede utilizarse para estimar el tiempo de solidificación de la fundición.

Mediante el control de la nucleación y del crecimiento, se le puede dar a una pieza fundida una estructura de granos columnares, una estructura de granos equiaxiales, o una mezcla de ambas. Es común un comportamiento isotrópico de los granos equiaxiales, en tanto se encuentra comportamiento anisotrópico en los granos columnares.

En los métodos comerciales de procesamiento por solidificación, se pueden controlar los defectos en una pieza fundida (como la contracción por solidificación o la porosidad ga-

seosa) mediante un diseño apropiado de fundición y de sistema de rebosaderos, o mediante un tratamiento adecuado del metal líquido antes de la fundición.

## GLOSARIO

**Calor específico** Grado térmico requerido para cambiar en un grado la temperatura de una unidad de peso del material.

**Calor latente de fusión  $\Delta H_f$**  El generado o liberado al solidificar un líquido. El calor latente de fusión está relacionado con la diferencia en energía entre el sólido y el líquido.

**Cavidad por contracción o rechupe** Hueco grande en forma de cono desde la superficie hasta el interior de una fundición, causado por la contracción volumétrica ocurrida durante la solidificación.

**Cavidad por contracción** Hueco grande dentro de una fundición causado por la contracción volumétrica que ocurre durante la solidificación.

**Contracción interdendrítica** Poros pequeños, frecuentemente aislados, entre los brazos dendríticos formados por la contracción que acompaña a la solidificación. También conocida como microcontracción o porosidad por contracción.

**Crecimiento** Proceso físico mediante el cual una fase nueva incrementa su tamaño. En el caso de la solidificación, esto se refiere a la formación de un sólido estable conforme se solidifica el líquido.

**Crecimiento epitaxial** Crecimiento de un líquido en un material sólido existente sin necesidad de nucleación.

**Crecimiento planar** Aumento de tamaño de una interfase sólido-líquido, lisa o plana, durante la solidificación, cuando no se tiene un líquido subenfriado.

**Dendrita** Estructura arboriforme del sólido que crece cuando ocurre la nucleación en un líquido subenfriado.

**Embrión** Pequeña partícula de sólido que se forma a partir del líquido conforme se aglomeran o agrupan los átomos. El embrión es demasiado pequeño para seguir creciendo.

**Esferulita** Cristales de forma esférica producidos cuando se solidifican ciertos polímeros.

**Espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios (EBDS)** Distancia entre los centros de dos brazos dendríticos secundarios adyacentes.

**Estabilización térmica** Meseta en la curva de enfriamiento durante la solidificación de un material. La estabilización térmica se genera por la salida del calor latente de fusión durante la solidificación.

**Estructura de lingote** Macroestructura de una fundición, incluyendo la zona templada, la zona columnar y la zona equiaxial.

**Inoculación** Adición controlada de elementos o partículas para incrementar la nucleación heterogénea y por lo tanto el número de granos en una fundición.

**Ley de Sievert** "La cantidad de un gas que se disuelve en un metal es proporcional a la presión parcial del gas en los alrededores."

**Macroestructura** Características de la estructura de los materiales que generalmente puede ser observada a simple vista.

**Nucleación** Proceso físico mediante el cual se produce una nueva fase dentro de un material. En el caso de la solidificación, significa la formación de un sólido minúsculo y estable dentro del líquido.

**Núcleo** Partícula diminuta de sólido que se forma a partir del líquido conforme se juntan los átomos. Cuando las partículas son lo suficientemente grandes para ser estables, ha ocurrido el proceso de nucleación y puede iniciarse el crecimiento del sólido.

**Nucleación heterogénea** Formación de un sólido de tamaño crítico a partir del líquido sobre la superficie de alguna impureza.

**Nucleación homogénea** Formación de un sólido de tamaño crítico a partir del líquido por la aglomeración o agrupamiento de un gran número de átomos a un subenfriamiento alto.

**Porosidad de gas o gaseosa** Burbujas de gas atrapadas dentro de una fundición durante su solidificación, causadas por la menor solubilidad del gas al estado sólido en comparación con la solubilidad al estado líquido.

**Proceso por solidificación rápida** Producción de estructuras únicas en los materiales, al someterlos a velocidades de enfriamiento extraordinariamente altas durante la solidificación.

**Radio crítico  $r^*$**  Tamaño mínimo del núcleo que deben formar los átomos al agruparse en el líquido, antes de que la partícula sólida sea estable y empiece a crecer.

**Rebosadero** Depósito con metal líquido adicional que está conectado a una fundición. Si el rebosadero se solidifica después de la fundición, proveerá metal líquido para compensar las contracciones.

**Refinación de grano** Adición de núcleos heterogéneos de manera controlada para incrementar el número de granos en una fundición.

**Regla de Chvorinov** Tiempo de solidificación de una fundición que es directamente proporcional al cuadrado de la relación volumen-a-superficie de la fundición.

**Sobrecalentamiento** Temperatura de vaciado menos la temperatura de solidificación.

**Soldadura por fusión** Procesos de unión en los cuales debe fundirse una porción de los materiales para tener una buena unión.

**Subenfriamiento** Temperatura a la cual debe enfriarse el metal líquido por debajo de la temperatura de solidificación al equilibrio, antes de que ocurra la nucleación.

**Temperatura de vaciado** Grado térmico de un metal al momento de ser vaciado en un molde durante el proceso de fundición.

**Tiempo de solidificación local** Periodo requerido para que solidifique un sitio particular de una fundición, una vez que se ha iniciado la nucleación.

**Tiempo de solidificación total** Periodo requerido para que la fundición se solidifique totalmente una vez vaciada en el molde.

**Zona equiaxial** Región de granos orientados al azar, como resultado de una nucleación generalizada en el centro de una fundición.

**Zona de fusión** Porción del material que se calienta hasta el estado líquido durante el proceso de soldadura. La solidificación de esta zona proporciona la unión.

**Zona columnar** Región de granos alargados, con una orientación cristalográfica preferencial, formada como resultado del crecimiento competitivo durante la solidificación de una fundición.

**Zona templada** Región de granos pequeños orientados al azar, que se forman en la superficie de una fundición, como resultado de una nucleación heterogénea.

## PROBLEMAS

**8-1** Suponga que se subenfriaría el níquel líquido hasta que ocurra la nucleación homogénea. Calcule

(a) el radio crítico del núcleo requerido y

(b) el número de átomos de níquel en el núcleo.

Suponga que el parámetro de red para el níquel sólido CCC es 0.356 nm.

**8-2** Suponga que el hierro líquido es subenfriado hasta que ocurre la nucleación homogénea. Calcule

(a) el radio crítico del núcleo requerido y

(b) el número de átomos de hierro en el núcleo.

Suponga que el parámetro de red para el hierro sólido CC es 2.92 Å.

**8-3** Suponga que el níquel sólido pudo nuclearse de manera homogénea con un subenfriamiento de sólo 22°C. ¿Cuántos átomos tendrían que aglomerarse de manera espontánea para que esto ocurriera? Suponga

que el parámetro de red para el níquel sólido CCC es 0.356 nm.

**8-4** Suponga que el hierro sólido pudo nuclearse de manera homogénea con un subenfriamiento de solamente 15°C. ¿Cuántos átomos tendrían que aglomerarse de manera espontánea para que esto ocurriera? Suponga que el parámetro de red del hierro sólido CC es 2.92 Å.

**8-5** Calcule la fracción de solidificación que ocurrirá dendríticamente al nuclear el hierro

- (a) a un subenfriamiento de 10°C,  
 (b) a un subenfriamiento de 100°C y  
 (c) de manera homogénea.

El calor específico del hierro es 5.78 J/cm<sup>3</sup>·°C.

**8-6** Calcule la fracción de solidificación que ocurre de manera dendrítica al nuclear la plata

- (a) a un subenfriamiento de 10°C,  
 (b) a un subenfriamiento de 100°C y  
 (c) de manera homogénea.

El calor específico de la plata es 3.25 J/cm<sup>3</sup>·°C.

**8-7** El análisis de una fundición de níquel sugiere que el 28% del proceso de solidificación ocurrió de manera dendrítica. Calcule la temperatura a la cual ocurrió la nucleación. El calor específico del níquel es 4.1 J/cm<sup>3</sup>·°C.

**8-8** Un cubo de 2 plg se solidifica en 4.6 minutos. Calcule

- (a) la constante del molde en la regla de Chvorinov y  
 (b) el tiempo de solidificación para una barra de 0.5 × 0.5 × 6 plg fundida bajo estas mismas condiciones. Suponga que  $n = 2$ .

**8-9** Una esfera de 5 cm de diámetro se solidifica en 1050 s. Calcule el tiempo de solidificación para una placa de 0.3 × 10 × 20 cm bajo las mismas condiciones. Suponga que  $n = 2$ .

**8-10** Encuentre las constantes  $B$  y  $n$  de la regla de Chvorinov trazando los siguientes datos en una gráfica log-log.

Dimensiones de la fundición (plg)	Tiempo de solidificación (min)
0.5 × 8 × 12	3.48
2 × 3 × 10	15.78
cubo 2.5	10.17
1 × 4 × 9	8.13

**8-11** Encuentre las constantes  $B$  y  $n$  de la regla de Chvorinov trazando los siguientes datos en una gráfica log-log.

Dimensiones de la fundición (cm)	Tiempo de solidificación (s)
1 × 1 × 6	28.58
2 × 4 × 4	98.30
4 × 4 × 4	155.89
8 × 6 × 5	306.15

**8-12** Se produjo una fundición de 3 plg de diámetro. Se midió el tiempo requerido para que la interfase sólido-líquido llegase a diferentes profundidades por debajo de la superficie de la fundición y aparece en la tabla siguiente:

Distancia de la superficie (plg)	Tiempo (s)
0.1	32.6
0.3	73.5
0.5	130.6
0.75	225.0
1.0	334.9

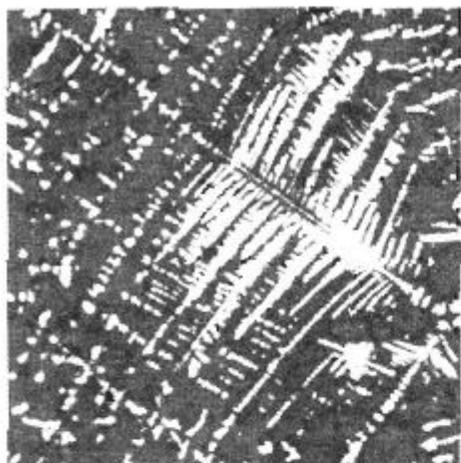
Determine:

- (a) el tiempo en el cual se inicia la solidificación en la superficie y  
 (b) el tiempo en el cual se espera que toda la fundición esté sólida.  
 (c) Suponga que la parte central de la fundición realmente se solidificó en 720 s. Explique por qué este tiempo pudiera ser distinto del calculado en el inciso b.

**8-13** La figura 8-6(b) muestra una fotografía de una aleación de aluminio. Estime

- (a) el espaciamiento entre los brazos dendríticos secundarios y  
 (b) el tiempo de solidificación local para dicha área de la fundición.

**8-14** La figura 8-22 muestra una fotografía de dendritas de FeO precipitadas en un vidrio cerámico (un líquido subenfriado). Estime el espaciamiento entre los brazos dendríticos secundarios.



**FIGURA 8-22** Microfotografía de dendritas de FeO en vidrio cerámico ( $\times 450$ ). (Para el problema 8-14.) (Cortesía de C. W. Ramsay, University of Missouri—Rolla.)

**8-15** Encuentre las constantes  $c$  y  $m$  que relacionan el espaciamiento entre brazos dendríticos secundarios con el tiempo de solidificación local, trazando los datos siguientes en una gráfica log-log.

Tiempo de solidificación (s)	EBDS (cm)
156	0.0176
282	0.0216
606	0.0282
1356	0.0374

**8-16** La figura 8-23 muestra las dendritas en una partícula de polvo de titanio rápidamente solidificado. Suponiendo que el tamaño de las dendritas de titanio está relacionado con el tiempo de solidificación según la misma relación que en el aluminio, estime el tiempo de solidificación de la partícula de polvo.

**8-17** El espaciamiento entre los brazos dendríticos secundarios en una soldadura por haz electrónico de cobre es de  $9.5 \times 10^{-4}$  cm. Estime el tiempo de solidificación de la soldadura.

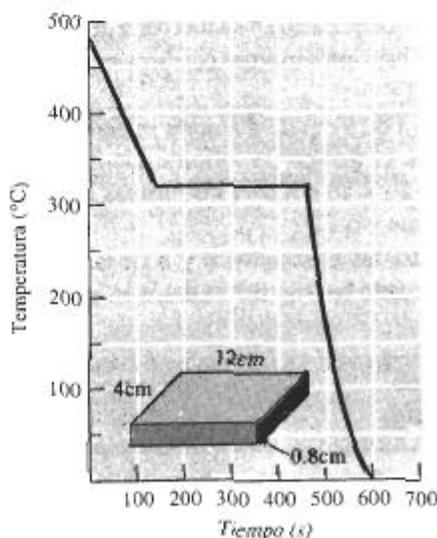
**8-18** En la figura 8-24 aparece una curva de enfriamiento. Determine

- la temperatura de vaciado,
- la temperatura de solidificación,

- el sobrecalentamiento,
  - la rapidez de enfriamiento, justo antes del inicio de la solidificación,
  - el tiempo de solidificación total,
  - el tiempo de solidificación local y
  - la identidad probable del metal.
- (h) Si la curva de enfriamiento se obtuvo a partir del centro de la fundición que se esboza en la figura, determine la constante del molde, suponiendo que  $n = 2$ .



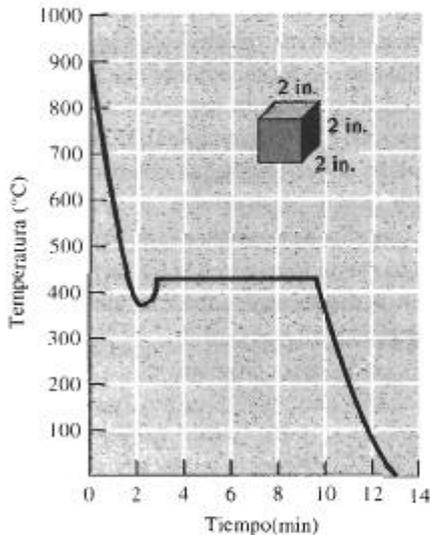
**FIGURA 8-23** Dendritas diminutas, expuestas dentro de una partícula de polvo de titanio debido a un proceso de solidificación rápida ( $\times 2200$ ). (De J. D. Ayers y K. Moore, "Formation of Metal Carbide Powder by Spark Machining of Reactive Metals". De Metallurgical Transactions, Vol. 15 A junio de 1984, Pág. 1120) (Para el problema 8-16.)



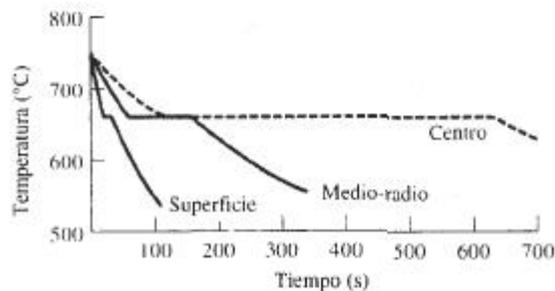
**FIGURA 8-24** Curva de enfriamiento (para el problema 8-18).

**8-19** En la figura 8-25 se muestra una curva de enfriamiento. Determine

- la temperatura de vaciado
- la temperatura de solidificación
- el sobrecalentamiento,
- la rapidez de enfriamiento, justo antes que se inicie la solidificación,
- el tiempo de solidificación total,
- el tiempo de solidificación local,
- el subenfriamiento, y
- la identidad probable del metal.
- Si la curva de enfriamiento fue obtenida en el centro de la fundición cuyo esquema aparece en la figura, determine la constante del molde, suponiendo que  $n = 2$ .



**FIGURA 8-25** Curva de enfriamiento (para el problema 8-19).



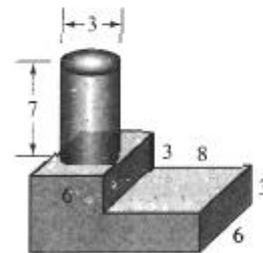
**FIGURA 8-26** Curvas de enfriamiento (para el problema 8-20).

**8-20** La figura 8-26 muestra las curvas de enfriamiento obtenidas en varios sitios dentro de una fundición cilíndrica de aluminio. Determine los tiempos de solidificación total y el EBDS de cada ubicación, y a continuación grafique la resistencia a la tensión en función de la distancia a la superficie de la fundición. ¿Recomendaría usted que la fundición se diseñe para que una mayor o menor cantidad de material deba ser maquinada desde la superficie durante el proceso de acabado? Explique

**8-21** Calcule el volumen, diámetro y altura del rebosadero cilíndrico requerido para impedir la contracción en una pieza fundida de  $4 \times 10 \times 20$  plg si  $H/D$  para el rebosadero tiene un valor de 1.5.

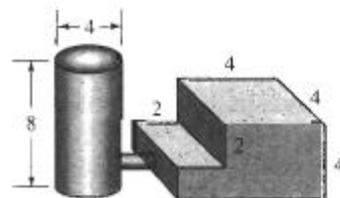
**8-22** Calcule el volumen, diámetro y altura del rebosadero cilíndrico requerido para impedir la contracción en una pieza fundida de  $1 \times 6 \times 6$  plg si  $H/D$  para el rebosadero tiene un valor de 1.0.

**8-23** La figura 8-27 muestra un rebosadero cilíndrico fijo a una pieza de fundición. Compare los tiempos de solidificación para cada sección de la fundición y del rebosadero, y determine si éste será eficaz.



**FIGURA 8-27** Fundición en escalón (para el problema 8-23).

**8-24** La figura 8-28 muestra un rebosadero cilíndrico fijo a una pieza de fundición. Compare los tiempos de solidificación para cada sección de la fundición y del rebosadero, y determine si éste será eficaz.



**FIGURA 8-28** Fundición en escalón (para el problema 8-24).

**8-25** Una esfera de cobre líquido de 4 plg de diámetro se solidifica, produciéndose una cavidad esférica por contracción en el centro de la fundición. Compare el volumen y el diámetro de la cavidad por contracción en la fundición de cobre, con la que se obtendría si se dejara solidificar una esfera de hierro líquido también de 4 plg de diámetro.

**8-26** Un cubo de 4 plg de metal líquido se solidifica, observándose una cavidad esférica por contracción de un diámetro de 1.49 plg en la fundición sólida. Determine el cambio volumétrico porcentual ocurrido durante la solidificación.

**8-27** Se produce una pieza de fundición de magnesio de  $2 \times 4 \times 6$  cm. Después de enfriarse a temperatura ambiente, se encuentra que la fundición pesa 80 g. Determine (a) el volumen de la cavidad por contracción en el centro de la pieza y

(b) el porcentaje de contracción que ocurrió durante la solidificación.

**8-28** Se produce una fundición de hierro de  $2 \times 8 \times 10$  plg y, después de enfriarse a temperatura ambiente, se encuentra que pesa 43.9 lb. Determine

(a) el porcentaje de contracción que ocurrió durante la solidificación y

(b) el número de poros de contracción en la fundición, si la totalidad de la contracción ocurre en forma de poros de 0.05 plg de diámetro.

**8-29** Se vacía magnesio líquido en un molde de  $2 \times 2 \times 24$  cm y, como resultado de la solidificación direccional, la totalidad de la contracción por solidificación ocurre a lo largo de la pieza fundida. Determine la longitud de la pieza inmediatamente después de que haya terminado la solidificación.

**8-30** Un hierro fundido líquido tiene una densidad de  $7.65 \text{ g/cm}^3$ . Inmediatamente después de la solidificación, se determina que la pieza sólida tiene una densidad de  $7.71 \text{ g/cm}^3$ . Determine el cambio porcentual volumétrico ocurrido durante la solidificación. ¿Se expande o se contrae el hierro fundido durante la solidificación?

**8-31** De la figura 8-16, encuentre la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido justo antes de que se inicie la solidificación y cuando la presión parcial de hidrógeno es de 1 atm. Determine la solubilidad del hidrógeno (en  $\text{cm}^3/100\text{g Al}$ ) a la misma temperatura, si la presión parcial se redujera a 0.01 atm.

**8-32** Se determina que la solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido a  $715^\circ\text{C}$  es de  $1 \text{ cm}^3/100 \text{ g Al}$ . Si todo este hidrógeno se precipitase en burbujas durante la

solidificación quedando atrapado en la fundición, calcule el porcentaje de volumen del gas en el aluminio sólido.

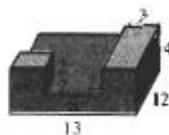


### Problemas de diseño

**8-33** Se funde aluminio en condiciones que resultan en  $0.06 \text{ cm}^3$  de  $\text{H}_2$  por 100 g de aluminio. Se ha encontrado que no se debe aceptar más de  $0.002 \text{ cm}^3$   $\text{H}_2$  por cada 100g de aluminio a fin de evitar la formación de burbujas de hidrógeno durante la solidificación. Diseñe un tratamiento para el aluminio líquido que asegure que no habrá formación de porosidad gaseosa por hidrógeno.

**8-34** Cuando se sueldan dos placas de cobre de 0.5 plg de espesor con soldadura de arco, la zona de fusión contiene dendritas con un EBDS de 0.006 cm. Sin embargo, el proceso produce esfuerzos residuales de importancia en el área de soldadura. Se ha encontrado que los esfuerzos residuales son bajos cuando las condiciones de la soldadura producen un EBDS mayor de 0.02 cm. Diseñe un proceso mediante el cual se puedan obtener bajos esfuerzos residuales. Justifique su diseño.

**8-35** Diseñe un sistema de rebosaderos eficiente para la pieza de fundición que se muestra en la figura 8-29. Asegúrese de incluir un diagrama del sistema, junto con las dimensiones apropiadas.



**FIGURA 8-29** Fundición a la cual se le debe diseñar un sistema de rebosaderos (para el problema 8-35).

**8-36** Diseñe un proceso que produzca una fundición de acero de propiedades uniformes y elevada resistencia. Asegúrese de incluir las características de la microestructura que desea controlar y explique cómo lo conseguiría.

**8-37** Una fundición de aluminio debe hacerse por inyección a presión en un molde de acero (fundición a presión). Esencialmente la pieza es un cilindro de 12 plg de largo y 2 plg de diámetro con una pared de espesor uniforme, y deberá tener una resistencia a la tensión mínima de 40,000 psi. Con base en las propiedades dadas en la figura 8-8, diseñe la fundición y el proceso.

# CAPÍTULO 9

## Equilibrio de fases y endurecimiento por solución sólida

### 9-1 Introducción

Las propiedades mecánicas de los materiales pueden controlarse por la adición de defectos puntuales como átomos sustitucionales e intersticiales. Particularmente en el caso de los metales, los defectos puntuales distorsionan el arreglo atómico en la red, interfiriendo con el movimiento o deslizamiento de las dislocaciones. Por tanto, los defectos puntuales hacen que el material se endurezca por solución sólida.

Además, la introducción de defectos puntuales modifica la composición del material, influyendo sobre el comportamiento durante la solidificación. Este efecto se analiza mediante el diagrama de fases al equilibrio, a partir del cual se podrá predecir cómo se solidificará un material tanto en condiciones de equilibrio como fuera de éste.

### 9-2 Fases y el diagrama de fases de sustancias puras

Los materiales puros tienen muchas aplicaciones en la ingeniería, pero con frecuencia se utilizan aleaciones o mezclas de materiales. Existen dos tipos de aleaciones: aleaciones de una fase y aleaciones de varias fases. En este capítulo se examinará el comportamiento de las aleaciones de una fase. Como primer paso, se definirá qué es fase y se verá la forma en que la regla de las fases ayuda a determinar el estado sólido, líquido o gaseoso, en el que existe un material puro.

**Fase** Una fase tiene las características siguientes: (1) una fase tiene una misma estructura o arreglo atómico en todo el material; (2) una fase tiene aproximadamente una misma composición y propiedades; y (3) hay una interfase definida entre una fase y cualquier otra que la rodea o que sea su vecina. Por ejemplo, si se encierra un bloque de hielo en una cámara de vacío [figura 9-1(a)], el hielo empezará a fundirse y, además, parte del agua se vaporizará. En estas condiciones, se tendrán en coexistencia tres fases:  $H_2O$  sólida,  $H_2O$  líquida y  $H_2O$  gaseosa. Cada una de estas formas del  $H_2O$  es una fase diferente; cada una tiene un arreglo atómico único, con propiedades únicas y con un borde o límite bien definido entre ellas. En este caso específico las fases tienen composiciones idénticas, pero este hecho no es suficiente para llamar a todo el sistema como una sola fase.

**Regla de fases** La **regla de fases de Gibbs** describe el estado de un material y tiene la forma general:

$$F = C - P + 2 \quad (9-1)$$

En la regla de fases,  $C$  es el número de los componentes, por lo general elementos o compuestos en el sistema;  $F$  es el número de grados de libertad, es decir, el número de variables por ejemplo temperatura, presión o composición, que pueden modificarse de manera independiente, sin cambiar el número de fases en equilibrio; y  $P$  es el número de fases presentes. El valor constante 2 en la ecuación implica que tanto la temperatura como la presión tienen posibilidad de cambiar.

Como ejemplo del uso de la regla de fases, considérese el caso del magnesio puro. En la figura 9-2 aparece un **diagrama de fases de un material puro** (o de un solo componente) en el cual las líneas dividen las fases de líquido, sólido y vapor. En **este diagrama** sólo hay un componente, en este caso magnesio. Sin embargo, dependiendo de la temperatura y de la presión, pudieran existir en cualquier momento *una, dos o incluso tres fases presentes*: magnesio sólido, magnesio líquido y vapor de magnesio. Observe que a la presión atmosférica (una atmósfera), que está indicada por la línea punteada, las intersecciones con las líneas en el diagrama de fases marcan las temperaturas usuales de fusión y de ebullición para el magnesio. A presiones muy bajas el sólido al ser calentado se puede *sublimar*, es decir, pasar directamente a vapor, sin fundirse.

Suponga que se tienen una presión y una temperatura que coloca al magnesio en el punto  $A$  del diagrama de fases, donde el todo es  $Mg$  líquido. En este punto, el número de componentes  $C$  es uno (magnesio) y el número de fases es una (líquido). La regla de las fases dice que

$$F = C - P + 2 = 1 - 1 + 2 = 2,$$

es decir, hay dos grados de libertad. Dentro de ciertos límites, se puede modificar ya sea la presión o la temperatura, o ambas, y todavía estar en una porción del diagrama, que indica que todo *el material es líquido*. Dicho de otra manera, se debe fijar a la vez la temperatura y la presión, para saber exactamente qué posición se ocupa en la porción líquida del diagrama.

Sin embargo, el punto  $B$  es el límite entre las porciones sólida y líquida del diagrama. El número de componentes  $C$  sigue siendo uno, pero en el punto  $B$  coexisten sólido y líquido, y el número de fases  $P$  es dos. De la regla de fases,

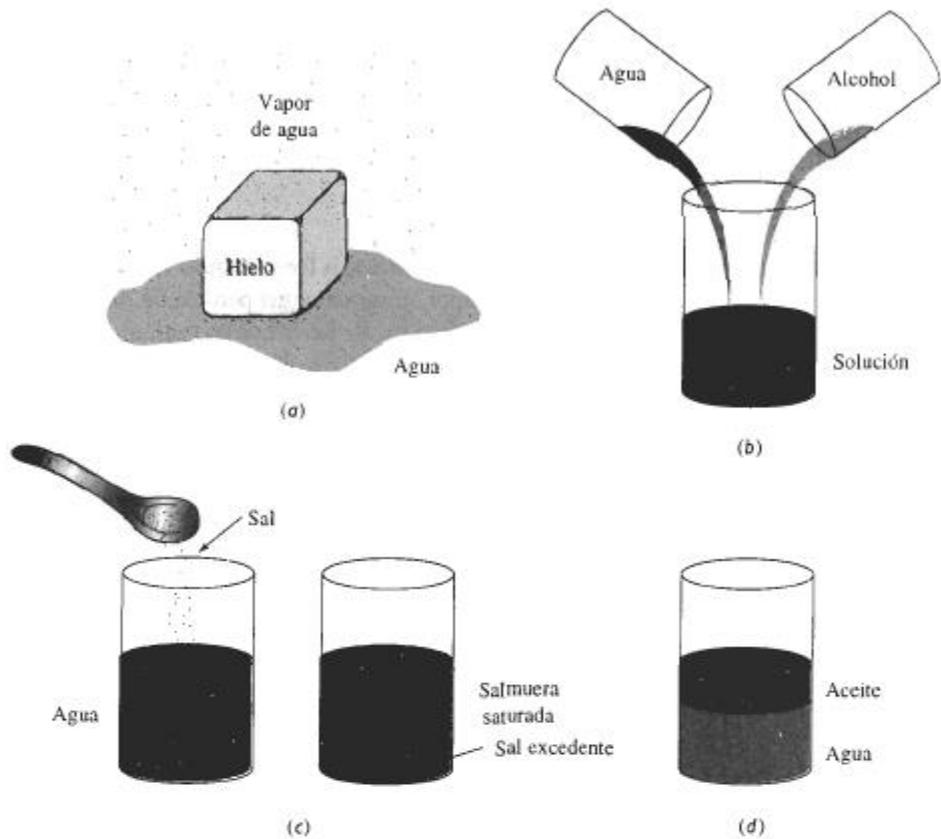
$$F = C - P + 2 = 1 - 2 + 2 = 1,$$

y sólo hay un grado de libertad. Por ejemplo, si se modifica la temperatura, también deberá modificarse la presión, si se ha de quedar en el límite donde coexisten líquido y sólido. Por otra parte, al fijar la presión, el diagrama de fases indica la temperatura que se deberá tener si han de coexistir tanto sólido como líquido.

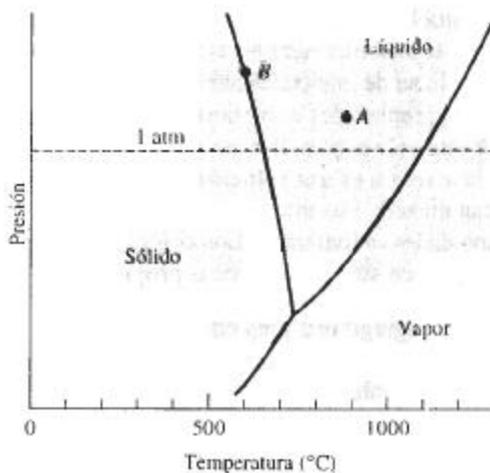
Finalmente, en el punto  $C$  coexisten sólido, líquido y vapor. Aunque el número de componentes sigue siendo uno, existen tres fases. El número de grados de libertad es:

$$F = C - P + 2 = 1 - 3 + 2 = 0,$$

Ahora ya no existen grados de libertad; coexistirán las tres fases únicamente si tanto la temperatura como la presión están fijas. Este estado es el **punto triple**.



**FIGURA 9-1** Ilustración de fases y solubilidad: (a) Las tres formas del agua, gas, líquido y sólido, siendo cada una de ellas una fase. (b) El agua y el alcohol tienen solubilidad limitada. (c) La sal y el agua tienen solubilidad limitada. (d) El aceite y el agua prácticamente no tienen solubilidad.



**FIGURA 9-2** Diagrama de fases para el magnesio, mostrando las temperaturas de fusión y de ebullición a una atmósfera de presión.