

# CAPÍTULO 16

## Materiales compuestos

### 16-1 Introducción

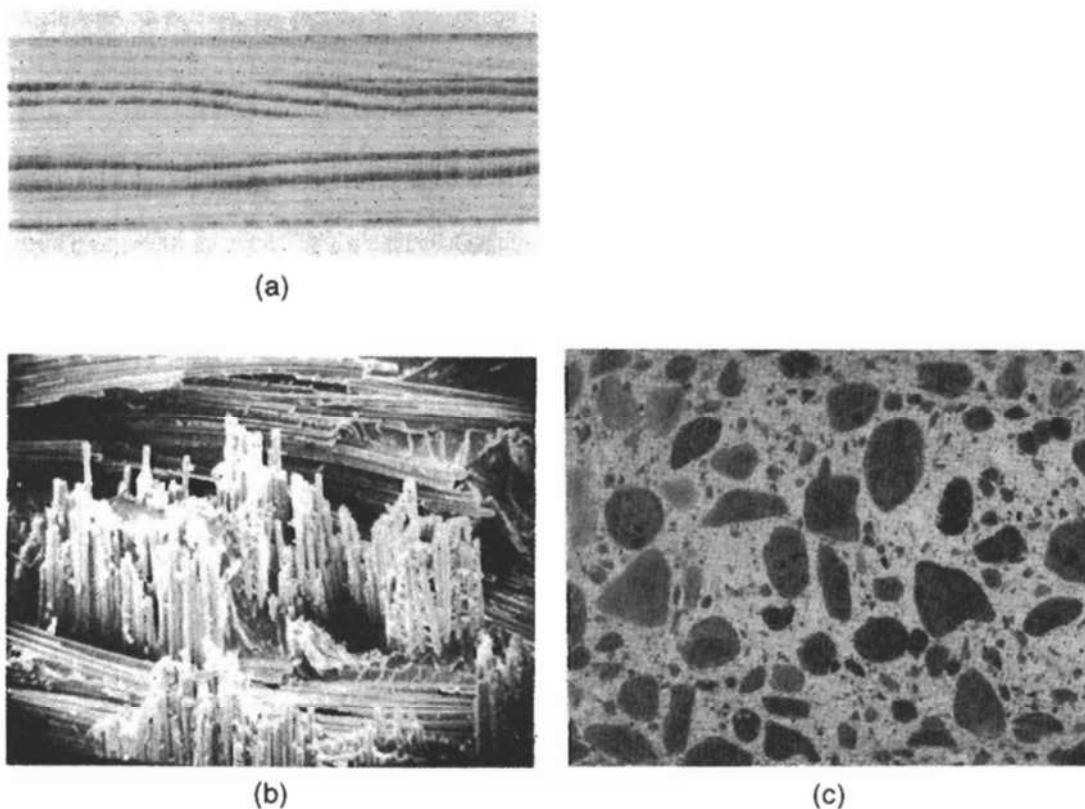
Los materiales compuestos se obtienen al unir dos materiales para conseguir una combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.

Los compuestos se pueden clasificar en tres categorías: con partículas, con fibras y laminares, dependiendo de la forma de los materiales (figura 16-1). El concreto, que es una mezcla de cemento y grava, es un compuesto particulado; la fibra de vidrio, que contiene fibras de vidrio incrustadas en un polímero, es un compuesto reforzado con fibras; y la madera contrachapada o triplay, que tiene capas alternas de chapa de madera, es un compuesto laminar. Si las partículas de refuerzo están distribuidas uniformemente, los compuestos particulados tendrán propiedades isotrópicas; los compuestos con fibras pueden ser isotrópicos o anisotrópicos; los laminares siempre tienen un comportamiento anisotrópico.

### 16-2 Compuestos reforzados por dispersión

Ampliando un poco la definición de un compuesto, es posible considerar como compuestos particulados un grupo especial de materiales endurecidos por dispersión, que contienen partículas de 10 a 250 nm de diámetro. Estos **dispersoides**, por lo general óxidos metálicos, se introducen en la matriz con métodos distintos a las transformaciones de fases. Aun cuando las pequeñas partículas no sean coherentes con la matriz, bloquean el movimiento de las dislocaciones y producen un pronunciado efecto de endurecimiento.

A temperatura ambiente, los compuestos endurecidos por dispersión pueden ser menos resistentes que las aleaciones tradicionales endurecidas por envejecimiento, que tienen un precipitado coherente. Sin embargo, la resistencia de estos materiales compuestos disminuye gradualmente al incrementarse la temperatura dado que no disminuyen sus propiedades en forma catastrófica por sobreenvejecimiento sobrerevenido, crecimiento de grano o crecimiento de la



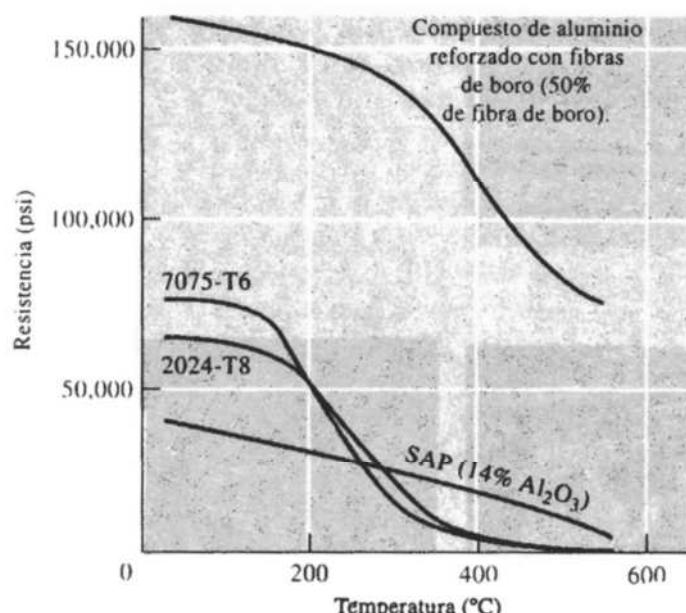
**FIGURA 16-1** Algunos ejemplos de materiales compuestos: (a) el triplay o madera contrachapada es un compuesto laminar de capas de chapas de madera. (b) La fibra de vidrio es un compuesto reforzado por fibra, que contiene largas fibras rígidas de vidrio en una matriz polimérica más blanda ( $\times 175$ ). (c) El concreto es un compuesto particulado, que contiene arena gruesa o grava en una matriz de cemento (reducido 50%).

fase dispersa (figura 16-2). Además, su resistencia a la termofluencia es superior a la de metales y aleaciones.

El dispersante debe tener baja solubilidad en la matriz y no reaccionar químicamente con ella, aunque un pequeño grado de solubilidad puede ayudar a mejorar la unión entre el dispersante y la matriz. El óxido de cobre ( $Cu_2O$ ) se disuelve en el cobre a altas temperaturas, por lo que el sistema  $Cu_2O$ -Cu no sería eficaz. Sin embargo, el  $Al_2O_3$  no se disuelve en el aluminio; el sistema  $Al_2O_3$ -Al proporciona materiales efectivos endurecidos por dispersión.

**Ejemplos de compuestos endurecidos por dispersión** La tabla 16-1 muestra algunos materiales interesantes. Quizás el ejemplo clásico es el compuesto de polvo de aluminio sinterizado (SAP), el cual tiene una matriz de aluminio endurecida con hasta 14 por ciento de  $Al_2O_3$ . El compuesto se forma por metalurgia de polvos. En un método se mezclan polvos de aluminio y alúmina, se compactan a altas presiones y luego se sinterizan. En una segunda técnica, el polvo de aluminio es tratado con el propósito de agregar una película continua de óxido a cada partícula. Al compactarse el polvo, la película de óxido se fractura en pequeñas hojuelas, que durante el sinterizado son rodeadas por el aluminio.

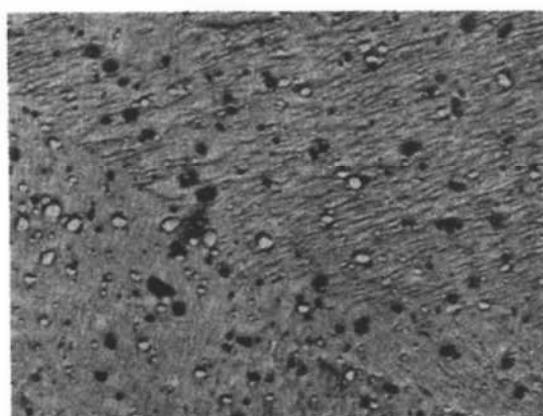
Otro grupo importante de compuestos endurecidos por dispersión incluye los metales con dispersión de torio como el níquel-TD (figura 16-3). El níquel-TD puede producirse por oxidación interna. El torio está presente en el níquel como un elemento de aleación. Después de



**FIGURA 16-2** Comparación del esfuerzo de cedencia elástico del material compuesto de polvo de aluminio sinterizado (PAS) endurecido por dispersión, con el de dos aleaciones convencionales de aluminio bifásicas de alta resistencia. El compuesto es mejor por arriba de aproximadamente los 300°C. Para comparar se muestra un material compuesto de aluminio reforzado con fibras.

**TABLA 16-1** Ejemplos y aplicaciones de compuestos endurecidos por dispersión

| Sistema   | Aplicaciones  |
|---|---|
| Ag-CdO  | Materiales para contactos eléctricos                          |
| Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                   | Uso posible en reactores nucleares                            |
| Be-BeO  | Aerosacial y reactores nucleares                              |
| Co-ThO <sub>2</sub> , Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Posibles materiales magnéticos resistentes a la termofluencia |
| Ni-20% Cr-ThO <sub>2</sub>                          | Componentes de turborreactores                                |
| Pb-PbO  | Rejillas para batería   |
| Pt-ThO <sub>2</sub>                                 | Filamentos, componentes eléctricos                            |
| W-ThO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>               | Filamentos, calentadores                                      |



**FIGURA 16-3** Micrografía electrónica del níquel TD. Las partículas dispersas de ThO<sub>2</sub> tienen un diámetro de 300 nm o menos (x 2000). (De Oxide Dispersion Strengthening, p.714, Gordon and Breach, 1968. © AIME.)

compactar el polvo, se permite que el oxígeno difunda en el metal, reaccione con el torio y produzca la toria ( $\text{ThO}_2$ ).

### EJEMPLO 16-1

Suponga que se agrega 2% en peso de  $\text{ThO}_2$  al níquel. Cada partícula de  $\text{ThO}_2$  tiene un diámetro de 1000 Å. ¿Cuántas partículas hay en cada  $\text{cm}^3$ ?

### SOLUCIÓN

Las densidades del  $\text{ThO}_2$  y del níquel son  $9.69 \text{ g/cm}^3$  y  $8.9 \text{ g/cm}^3$  respectivamente. La fracción volumétrica es

$$f_{\text{ThO}_2} = \frac{2/9.69}{2/9.69 + 98/8.9} = 0.0184$$

Por tanto, hay  $0.0184 \text{ cm}^3$  de ThO por  $\text{cm}^3$  de compuesto. El volumen de cada esfera de  $\text{ThO}_2$  es

$$V_{\text{ThO}_2} = \frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{4}{3}\pi(0.5 \times 10^{-5} \text{ cm})^3 = 0.52 \times 10^{-15} \text{ cm}^3$$

$$\text{Número de } \text{ThO}_2 = \frac{0.0184}{0.52 \times 10^{-15}} = 35.4 \times 10^{12} \text{ partículas/cm}^3$$



## 16-3 Compuestos particulados verdaderos

Los compuestos particulados verdaderos contienen grandes cantidades de partículas gruesas, que no bloquean el deslizamiento con eficacia. Estos compuestos están diseñados para producir combinaciones de propiedades poco usuales, y no para mejorar la resistencia.

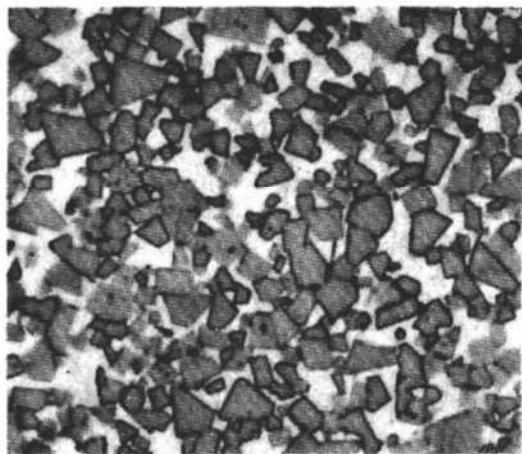
**Regla de las mezclas** Ciertas propiedades de un compuesto particulado dependen sólo de las cantidades y propiedades relativas de los constituyentes. La **regla de las mezclas** puede predecir con exactitud estas propiedades. Por ejemplo, la densidad de un compuesto particulado es:

$$\rho_c = \sum f_i \rho_i = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \cdots + f_n \rho_n, \quad (16-1)$$

donde  $\rho_c$  es la densidad del compuesto;  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  son las densidades de cada uno de los constituyentes dentro del compuesto y  $f_1, f_2, \dots, f_n$  son las fracciones volumétricas de cada constituyente.

**Carburos cementados** Los carburos cementados o cermets, contienen partículas cerámicas duras dispersas en una matriz metálica. Los insertos de carburo de tungsteno que se utilizan para herramientas de corte en operaciones de maquinado son ejemplos típicos de este grupo. El carburo de tungsteno (WC) es un cerámico duro, rígido y de alta temperatura de fusión. Desafortunadamente, las herramientas fabricadas de carburo de tungsteno son extremadamente frágiles.

A fin de mejorar su tenacidad, las partículas de carburo de tungsteno se combinan con polvo de cobalto y se comprimen para producir preformas de polvo compactado. Estas piezas se calientan por encima de la temperatura de fusión del cobalto. El cobalto líquido rodea las partículas sólidas de carburo de tungsteno (figura 16-4). Después de la solidificación, el cobalto sirve como pegamento de las partículas de carburo de tungsteno, dando buena resistencia al impacto. Otros carburos, como el TaC y el TiC, también pueden incluirse en el cermet.



**FIGURA 16-4** Microestructura de un carburo cementado formado por carburo de tungsteno y 20% cobalto ( $\times 1300$ ). (De Metals Handbook, Vol. 7, 8a. Ed., American Society for Metals, 1972.)

### EJEMPLO 16-2

Una herramienta de corte de carburo cementado utilizada para maquinado, contiene 75% en peso de WC, 15% en peso de TiC, 5% en peso de TaC y 5% en peso de Co. Estime la densidad del compuesto.

### SOLUCIÓN

Primero, se deben convertir los porcentajes en peso a fracciones volumétricas. Las densidades de los compuestos son:

$$\rho_{WC} = 15.77 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_{TiC} = 4.94 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{TaC} = 14.5 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_{Co} = 8.90 \text{ g/cm}^3$$

$$f_{WC} = \frac{75/15.77}{75/15.77 + 15/4.94 + 5/14.5 + 5/8.9} = \frac{4.76}{8.70} = 0.547$$

$$f_{TiC} = \frac{15/4.94}{8.70} = 0.349$$

$$f_{TaC} = \frac{5/14.5}{8.70} = 0.040$$

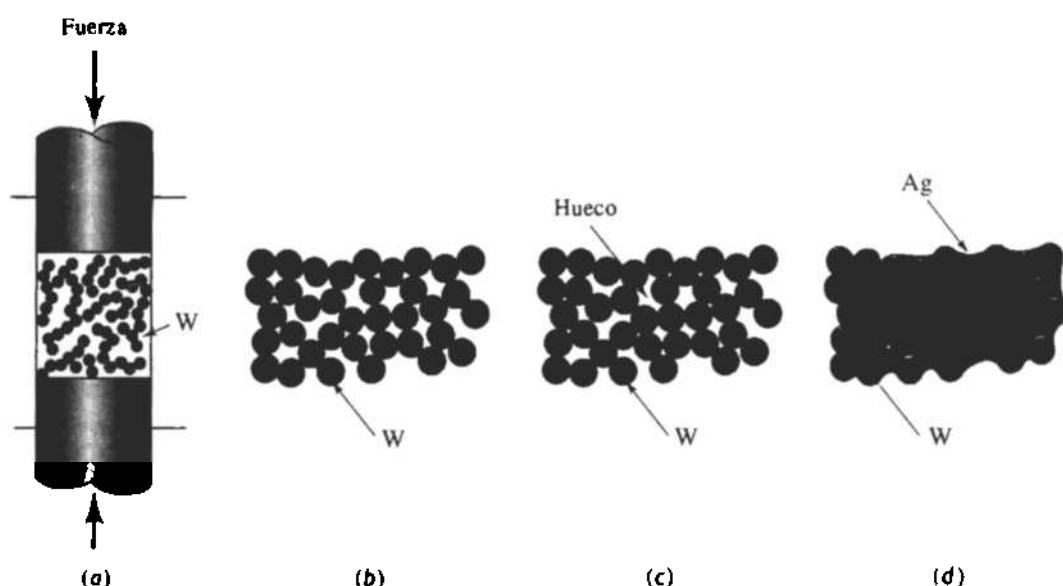
$$f_{Co} = \frac{5/8.90}{8.70} = 0.064$$

De la regla de las mezclas, la densidad del compuesto es

$$\begin{aligned} \rho_c &= \sum f_i \rho_i = (0.547)(15.77) + (0.349)(4.94) + (0.040)(14.5) \\ &\quad + (0.064)(8.9) \\ &= 11.50 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

**Abrasivos** Los discos para rectificado y corte se forman a partir de alúmina ( $Al_2O_3$ ), carburo de silicio ( $SiC$ ) y nitrógeno de boro cúbico ( $BN$ ). Para conseguir su tenacidad, las partículas abrasivas se cementan usando una matriz vítreo o polimérica. Los abrasivos de diamante típicamente se unen mediante una matriz metálica. Conforme las partículas duras se desgastan, se rompen o salen de la matriz, se exponen nuevas superficies de corte.

**Contactos eléctricos** Los materiales utilizados en interruptores y relevadores para contactos eléctricos deben tener una buena combinación de resistencia al desgaste y conductividad eléctrica. De lo contrario, los contactos se erosionan, causando contactos deficientes y arco eléctrico. La plata reforzada con tungsteno proporciona esta combinación de características. Se fabrica un compacto de polvo de tungsteno utilizando procesos convencionales de metalurgia de polvos a fin de producir una alta porosidad interconectada (figura 16-5). A continuación se infiltra plata líquida en vacío, para que llene los huecos interconectados. La plata y el tungsteno son continuos. Por tanto, la plata pura conduce la corriente con eficiencia, en tanto que el tungsteno duro aporta la resistencia al desgaste.



**FIGURA 16-5** Pasos para la producción de un compuesto eléctrico plata-tungsteno:  
 (a) se comprime el polvo de tungsteno, (b) se produce un compacto de baja densidad, (c) el sinterizado une los polvos de tungsteno y (d) la plata líquida es infiltrada en los poros entre partículas.

### EJEMPLO 16-3

Se produce un compuesto plata-tungsteno para contactos eléctricos fabricando en primer término un compacto de tungsteno poroso por metalurgia de polvos y, a continuación, infiltrando plata pura en los poros. La densidad del compacto del tungsteno, antes de la infiltración es de  $14.5 \text{ g/cm}^3$ . Calcule la fracción volumétrica de porosidad y el porcentaje final en peso de la plata, en el compacto después de la infiltración.

### SOLUCIÓN

Las densidades del tungsteno puro y de la plata pura son  $19.3 \text{ g/cm}^3$  y  $10.49 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. Se puede suponer que la densidad de un poro es cero, por lo que, de acuerdo con la regla de las mezclas

$$\rho_c = f_w \rho_W + f_{\text{poro}} \rho_{\text{poro}}$$

$$14.5 = f_w(19.3) + f_{\text{poro}}(0)$$

$$f_w = 0.75$$

$$f_{\text{poro}} = 1 - 0.75 = 0.25$$

Después de la infiltración, la fracción volumétrica de la plata es igual a la fracción volumétrica de los poros

$$f_{Ag} = f_{poro} = 0.25$$

$$\% \text{ en peso de Ag} = \frac{(0.25)(10.49)}{(0.25)(10.49) + (0.75)(19.3)} \times 100 = 15.3\%$$

Esta solución supone que todos los poros están abiertos o interconectados.

**Polímeros** Muchos polímeros para ingeniería, que contienen rellenos y extensores son compuestos particulados. Un ejemplo clásico es el negro de humo, en el caucho vulcanizado. El negro de humo está formado por partículas esféricas diminutas de carbono, de 5 a 500 nm de diámetro. El negro de humo mejora la resistencia, rigidez, dureza, resistencia al desgaste y resistencia al calor del caucho.

En algunos polímeros se utilizan extensores como carbonato de calcio, esferas sólidas de vidrio y diversas arcillas, a fin de lograr que se requiera una menor cantidad de polímero, y se reduzca el costo. Los extensores pueden hacer más rígido al polímero, incrementando su dureza, su resistencia al desgaste, su conductividad térmica, y mejorando su resistencia a la termofluencia; sin embargo, normalmente reducen la tenacidad y la ductilidad (figura 16-6). La introducción de esferas huecas de vidrio puede provocar los mismos cambios en las propiedades y al mismo tiempo reducir de manera significativa el peso del compuesto.

Pueden obtenerse otras propiedades especiales. Para mejorar la tenacidad de los polímeros, se pueden introducir partículas de elastómero. En aplicaciones nucleares el polietileno puede contener polvos metálicos como el plomo, para mejorar la absorción de los productos de la fisión.

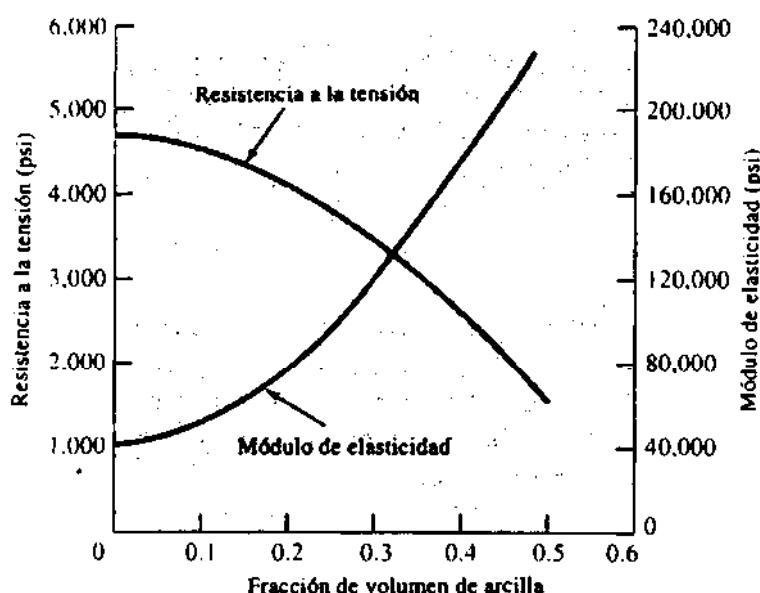


FIGURA 16-6 Efecto de la arcilla sobre las propiedades del polietileno.

#### EJEMPLO 16-4 Diseño de un compuesto polimérico particulado

Diseñe un compuesto de polietileno relleno de arcilla para producir artículos de bajo costo por moldeo por inyección. La pieza final debe tener una resistencia a la tensión de por lo menos 3000 psi y un módulo de elasticidad de por lo menos 80,000 psi. El costo del polipropileno es

de aproximadamente 50 centavos por libra y la arcilla cuesta alrededor de 5 centavos por libra. La densidad del polietileno es de  $0.95 \text{ g/cm}^3$  y la de la arcilla de  $2.4 \text{ g/cm}^3$ .

### SOLUCIÓN

De la figura 16-6, se requiere una fracción volumétrica de arcilla por debajo de 0.35 para mantener una resistencia a la tensión superior a 3000 psi, en tanto que para obtener el módulo de elasticidad mínimo es necesaria por lo menos una fracción volumétrica de 0.2. Para reducir el costo al mínimo, se utilizará el máximo de arcilla permisible, es decir una fracción volumétrica de 0.35.

En  $1000 \text{ cm}^3$  de partes del compuesto, hay  $350 \text{ cm}^3$  de arcilla y  $650 \text{ cm}^3$  de polietileno, es decir

$$\frac{(350 \text{ cm}^3)(2.4 \text{ g/cm}^3)}{454 \text{ g/lb}} = 1.85 \text{ lb de arcilla}$$

$$\frac{(650 \text{ cm}^3)(0.95 \text{ g/cm}^3)}{454 \text{ g/lb}} = 1.36 \text{ lb de polietileno}$$

El costo de los materiales es:

$$(1.85 \text{ lb de arcilla})(\$0.05/\text{lb}) = \$0.0925$$

$$(1.36 \text{ lb de PE})(\$0.50/\text{lb}) = \$0.68$$

$$\text{total} = \$0.7725 \text{ por } 1000 \text{ cm}^3$$

Suponga que el peso es crítico. La densidad del compuesto es:

$$\rho_c = (0.35)(2.4) + (0.65)(0.95) = 1.4575 \text{ g/cm}^3$$

Quizás se desea sacrificar parte del ahorro, a fin de obtener un menor peso. Si se utiliza una fracción volumétrica de sólo 0.2 de arcilla, con el mismo método que se utilizó arriba, se encuentra que son necesarias 1.06 lb de arcilla y 1.67 lb de polietileno. Ahora, el costo de los materiales es:

$$(1.06 \text{ lb de arcilla})(\$0.05/\text{lb}) = \$0.053$$

$$(1.67 \text{ lb de PE})(\$0.50/\text{lb}) = \$0.835$$

$$\text{total} = \$0.89 \text{ por } 1000 \text{ cm}^3$$

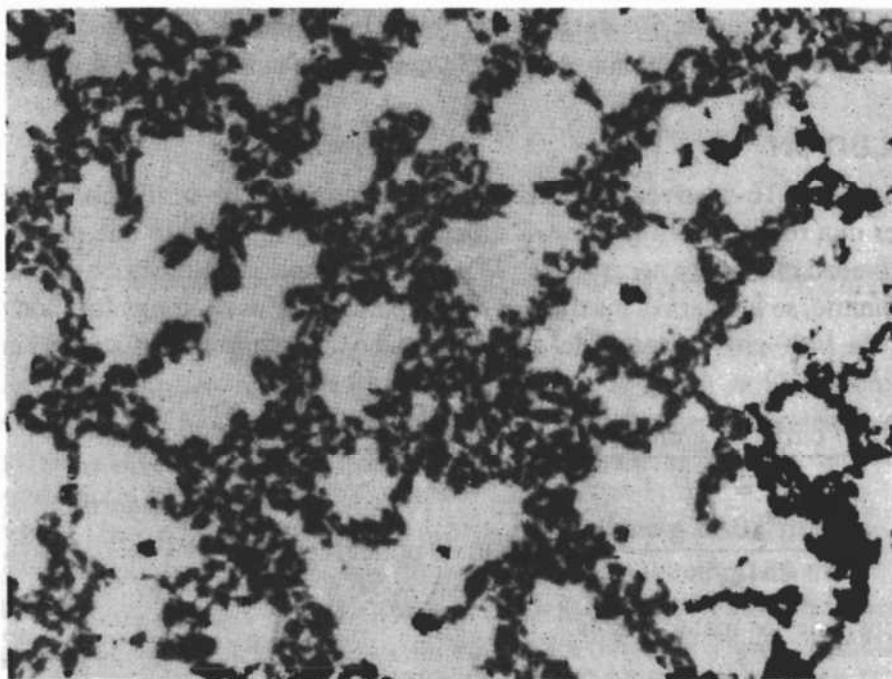
La densidad del compuesto es:

$$\rho_c = (0.2)(2.4) + (0.8)(0.95) = 1.24 \text{ g/cm}^3$$

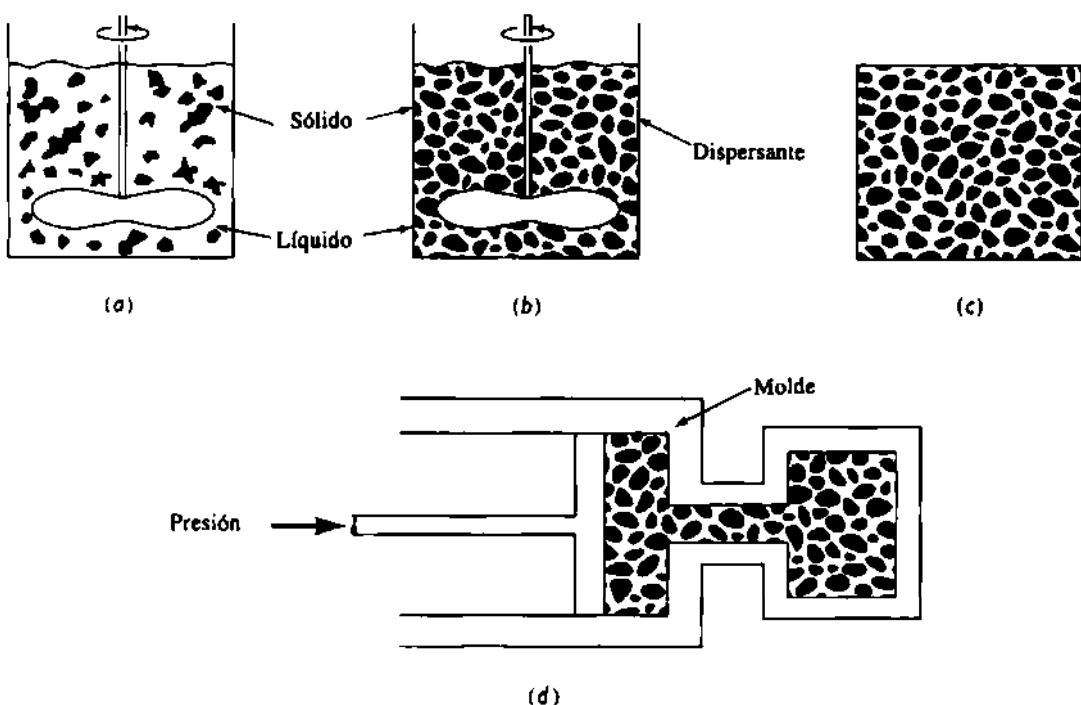
Los materiales cuestan aproximadamente 10% más, pero se obtiene una disminución del peso superior al 10%. ■

**Compuestos particulados de metales fundidos** Las fundiciones de aluminio con partículas de SiC dispersas para aplicación automotriz, incluyendo pistones y bielas, representan una aplicación comercial de importancia para los compuestos particulados (figura 16-7). Con un proceso especial, las partículas de SiC pueden ser mojadas por el líquido, ayudando a evitar que las partículas cerámicas se hundan durante la solidificación.

Una técnica poco usual para producir fundiciones reforzadas con particulados se basa en el comportamiento tixotrópico de fundiciones parte líquidas y parte sólidas. A una aleación líquida se le permite enfriar hasta que se forme aproximadamente el 40 por ciento de la fase sólida. Durante la solidificación, la mezcla sólida-líquida se agita vigorosamente a fin de romper la estructura dendrítica (figura 16-8). Durante el mezclado se introducen las partículas de



**FIGURA 16-7** Microestructura de una aleación de fundición de aluminio reforzada con partículas de carburo de silicio. En este caso, las partículas de refuerzo se han segregado a las regiones interdendríticas de la fundición ( $\times 125$ ). (Cortesía de David Kennedy, Lester B. Knight Cast Metals Inc.)



**FIGURA 16-8** En el vaciado compuesto, (a) se agita una aleación durante su solidificación a fin de romper la red dendrítica, (b) en el estado semisólido se introduce un material de refuerzo, (c) cuando no se le aplica ninguna fuerza, la mezcla sólido-líquido no fluye, y (d) una alta presión hace que la mezcla sólido-líquido fluya dentro de un molde.

material. La mezcla sólido-líquido resultante presenta un comportamiento tixotrópico, es decir, se comporta como sólido cuando no se le aplica ningún esfuerzo, pero fluye como líquido al ejercerse una presión. En consecuencia, esta mezcla tixotrópica puede inyectarse a presión en un molde, proceso llamado compocolado. Utilizando esta técnica se han incorporado en las aleaciones de aluminio y de magnesio una diversidad de partículas cerámicas y de esferas de vidrio.

## 16-4 Compuestos reforzados con fibras

La mayoría de los compuestos reforzados con fibra consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La resistencia del compuesto puede resultar alta a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas (figura 16-2).

Se emplean muchos tipos de materiales de refuerzo. Por siglos se ha utilizado la paja para reforzar los ladrillos de barro o adobes. En las estructuras de concreto se introducen varillas de acero de refuerzo. Las fibras de vidrio en una matriz polimérica producen un material para aplicaciones en la transportación y la industria aeroespacial. Las fibras de boro, carbono, polímeros y materiales cerámicos aportan un refuerzo excepcional en compuestos avanzados basados en matriz polimérica, metálica, cerámica e incluso en compuestos intermetálicos.

**La regla de las mezclas en los compuestos reforzados por fibra** Igual que en el caso de los compuestos particulados, la regla de las mezclas siempre dará la densidad de los compuestos reforzados con fibra

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f, \quad (16-2)$$

donde los subíndices  $m$  y  $f$  se refieren a la matriz y a la fibra. Observe que  $f_m = 1 - f_f$ .

Además, la regla de las mezclas predice con exactitud las conductividades eléctrica y térmica de compuestos reforzados con fibra a lo largo de la dirección de las fibras, si éstas son continuas y unidireccionales:

$$K_c = f_m K_m + f_f K_f \quad (16-3)$$

$$\sigma_c = f_m \sigma_m + f_f \sigma_f, \quad (16-4)$$

donde  $K$  es la conductividad térmica y  $\sigma$  es la conductividad eléctrica. La energía térmica o eléctrica puede transferirse a través del compuesto a una velocidad proporcional a la fracción volumétrica del material conductor. En un compuesto con una matriz metálica y fibras cerámicas, el grueso de la energía se transfiere a través de la matriz; en un compuesto formado por una matriz polimérica con fibras metálicas, la energía se transfiere a través de las fibras.

Cuando las fibras no son continuas o unidireccionales, no se puede aplicar esta regla. Por ejemplo, en un compuesto de matriz polimérica con fibras metálicas, la conductividad eléctrica es baja y depende de la longitud de las fibras, de la fracción volumétrica de las mismas y de la frecuencia con que las fibras se tocan entre sí.

**Módulo de elasticidad** Cuando las fibras son continuas y unidireccionales se utiliza la regla de las mezclas para predecir el módulo de elasticidad. Medido paralelamente a las fibras, el módulo de elasticidad puede tener un valor tan alto como:

$$E_c = f_m E_m + f_f E_f \quad (16-5)$$

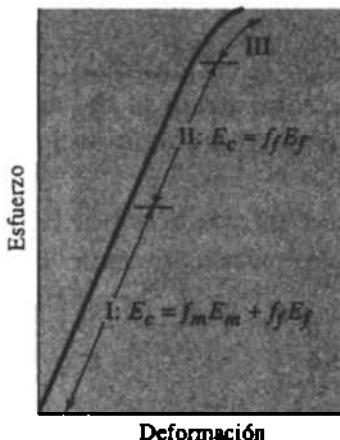
Sin embargo, cuando el esfuerzo aplicado es muy grande, la matriz comienza a deformarse y la curva esfuerzo-deformación ya no es lineal (figura 16-9). Dado que ahora la matriz contribuye poco a la rigidez del compuesto, el módulo se puede estimar aproximadamente mediante

$$E_c = f_f E_f \quad (16-6)$$

Cuando la carga se aplica perpendicularmente a las fibras, cada componente del compuesto actuará independientemente. Ahora el módulo del compuesto es:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f} \quad (16-7)$$

Otra vez, si las fibras no son continuas y unidireccionales, la regla de las mezclas no se aplica.



**FIGURA 16-9** Curva esfuerzo-deformación de un compuesto reforzado con fibras. A esfuerzos bajos, se obtiene el módulo de elasticidad mediante la regla de las mezclas. A esfuerzos más altos, la matriz se deforma y ya no se cumple la regla de las mezclas.

### EJEMPLO 16-5

Deduzca la regla de las mezclas (ecuación 16-5) para el módulo de elasticidad de un compuesto reforzado con fibras, cuando se aplica un esfuerzo a lo largo del eje de las mismas.

### SOLUCIÓN

La fuerza total que actúa sobre el compuesto es la suma de las fuerzas soportadas por cada constituyente:

$$F_c = F_m + F_f$$

Dado que  $F = \sigma A$

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f$$

$$\sigma_c = \sigma_m \left( \frac{A_m}{A_c} \right) + \sigma_f \left( \frac{A_f}{A_c} \right)$$

Si las fibras tienen una sección transversal uniforme, la fracción de área es igual a la fracción volumétrica  $f$

$$\sigma_c = \sigma_m f_m + \sigma_f f_f$$

De la ley de Hooke,  $\sigma = E\varepsilon$ . Por tanto

$$E_c \varepsilon_c = E_m \varepsilon_m f_m + E_f \varepsilon_f f_f$$

Si las fibras están unidas rígidamente a la matriz, tanto fibras como matriz deberán estirarse en cantidades iguales (condiciones de isodeformación)

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

$$E_c = f_m E_m + f_f E_f$$

#### EJEMPLO 16-6

Deduzca la ecuación para el módulo de elasticidad de un compuesto reforzado con fibras, cuando se aplica un esfuerzo perpendicular al eje de las fibras (ecuación 16-7).

#### SOLUCIÓN

En este ejemplo las deformaciones ya no son iguales; en su lugar, la suma ponderada de las deformaciones de cada componente es igual a la deformación total del compuesto, en tanto que los esfuerzos en cada componente son iguales (condición de isoefuerzo)

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= f_m \varepsilon_m + f_f \varepsilon_f \\ \frac{\sigma_c}{E_c} &= f_m \left( \frac{\sigma_m}{E_m} \right) + f_f \left( \frac{\sigma_f}{E_f} \right) \end{aligned}$$

Dado que  $\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f$ :

$$\frac{1}{E_c} = \frac{f_m}{E_m} + \frac{f_f}{E_f}$$

**Resistencia de los compuestos** La resistencia de un compuesto reforzado con fibras depende de la unión entre las fibras y la matriz. Sin embargo, a veces se utiliza la regla de las mezclas para tener una estimación de la resistencia a la tensión de un compuesto con fibras continuas y paralelas

$$\sigma_c = f_f \sigma_f + f_m \sigma_m, \quad (16-8)$$

donde  $\sigma_f$  es la resistencia a la tensión de la fibra y  $\sigma_m$  es el esfuerzo que actúa sobre la matriz, cuando el compuesto está deformado hasta el punto donde se fractura la fibra. Por lo que  $\sigma_m$  no es la resistencia a la tensión real de la matriz. Otras propiedades, como la ductilidad, las propiedades al impacto, a fatiga y a termofluencia son difíciles de predecir, incluso para fibras alineadas de manera unidireccional.

#### EJEMPLO 16-7

El aluminio reforzado con un 40 por ciento en volumen de fibras de borsic (fibra de boro) es un importante material compuesto, ligero y para uso a altas temperaturas. Estime la densidad, el módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión paralelas a los ejes de las fibras. Estime también el módulo de elasticidad perpendicular a las fibras.

**SOLUCIÓN**

Las propiedades individuales de los componentes se muestran a continuación.

| Material | Densidad<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Módulo<br>de elasticidad<br>(psi) | Resistencia<br>a la tensión<br>(psi) |
|----------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Fibras   | 2.36                             | 55,000,000                        | 400,000                              |
| Aluminio | 2.70                             | 10,000,000                        | 5,000                                |

De la regla de las mezclas

$$\rho_c = (0.6)(2.7) + (0.4)(2.36) = 2.56 \text{ g/cm}^3$$

$$E_c = (0.6)(10 \times 10^6) + (0.4)(55 \times 10^6) = 28 \times 10^6 \text{ psi}$$

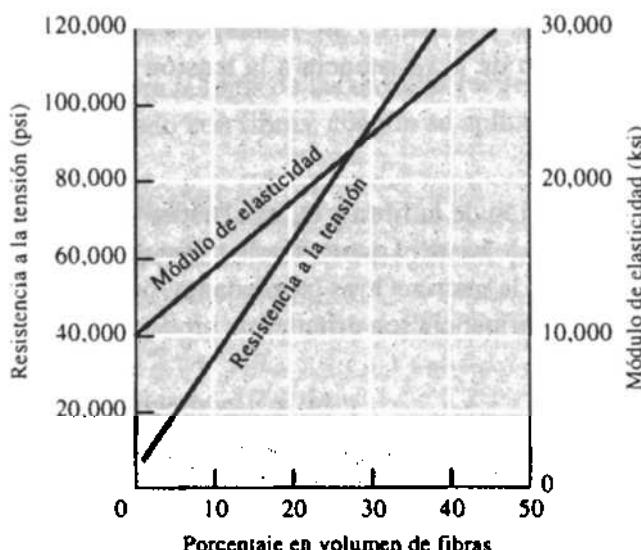
$$TS_c = (0.6)(5,000) + (0.4)(400,000) = 163,000 \text{ psi}$$

Perpendicular a las fibras

$$\frac{1}{E_c} = \frac{0.6}{10 \times 10^6} + \frac{0.4}{55 \times 10^6} = 0.06727 \times 10^{-6}$$

$$E_c = 14.9 \times 10^6 \text{ psi}$$

El módulo y la resistencia reales paralelos a las fibras aparecen en la figura 16-10. El módulo de elasticidad calculado ( $28 \times 10^6$  psi) es exactamente el mismo que el módulo medido. Sin embargo, la resistencia estimada (163,000 psi) es sustancialmente superior a la real (aproximadamente 130,000 psi). También se destaca que el módulo de elasticidad es muy anisotrópico, siendo el módulo perpendicular a la fibra de sólo la mitad del módulo paralelo.



**FIGURA 16-10** Influencia del porcentaje en volumen de fibras de boro sobre las propiedades del aluminio reforzado con dicho compuesto cuando las fibras son paralelas al esfuerzo aplicado (para el ejemplo 16-7).

**EJEMPLO 16-8**

Las fibras de vidrio refuerzan al nylon. Si el nylon contiene 30% en volumen de vidrio E. ¿qué fracción de la fuerza aplicada soportan las fibras de vidrio?

**SOLUCIÓN**

El módulo de elasticidad para cada componente del compuesto es:

$$E_{\text{vidrio}} = 10.5 \times 10^6 \text{ psi} \quad E_{\text{nylon}} = 0.4 \times 10^6 \text{ psi}$$

Si la unión es buena, tanto el nylon como las fibras de vidrio sufren igual deformación, por lo que

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f}$$

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_m} = \frac{E_f}{E_m} = \frac{10.5 \times 10^6}{0.4 \times 10^6} = 26.25$$

$$\begin{aligned} \text{Fracción} &= \frac{F_f}{F_f + F_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_f A_f + \sigma_m A_m} = \frac{\sigma_f(0.3)}{\sigma_f(0.3) + \sigma_m(0.7)} \\ &= \frac{0.3}{0.3 + 0.7(\sigma_m/\sigma_f)} = \frac{0.3}{0.3 + 0.7(1/26.25)} = 0.92 \end{aligned}$$

Casi toda la carga es soportada por las fibras de vidrio.

**16-5 Características de los compuestos reforzados con fibras**

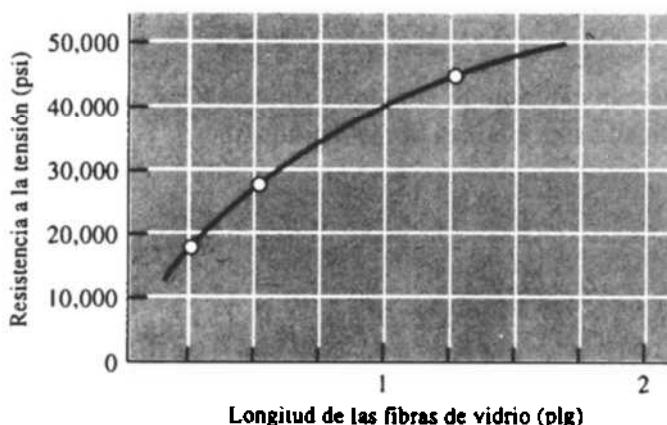
Al diseñar un compuesto reforzado con fibras se deben tomar en consideración muchos factores como la longitud, el diámetro, la orientación, la cantidad y propiedades de las fibras, las propiedades de la matriz; y la unión entre fibras y matriz.

**Longitud y diámetro de las fibras** Las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas. A menudo se caracterizan sus dimensiones mediante la **relación forma**  $l/d$ , donde  $l$  es la longitud de las fibras y  $d$  su diámetro. Las fibras típicas tienen diámetros que varían desde 10 micrones ( $10 \times 10^{-4}$  cm) hasta 150 micrones ( $150 \times 10^{-4}$  cm).

La resistencia del compuesto mejora cuando la relación de forma es grande. A menudo las fibras se fracturan debido a defectos de superficie. Fabricarlas con un diámetro lo más pequeño posible, le da a la fibra menos área superficial; en consecuencia, hay menos defectos que pueden propagarse durante el proceso o bajo carga. También se prefieren fibras largas. Los extremos de una fibra soportan menos carga que el resto; por tanto, a menos extremos, mayor capacidad de las fibras para soportar carga (figura 16-11).

En muchos sistemas reforzados, se utilizan fibras discontinuas con una relación de forma por encima de algún valor crítico, a fin de conseguir un término medio aceptable entre la facilidad de procesamiento y sus propiedades. Para cualquier diámetro dado de fibra  $d$ , se puede determinar una longitud crítica de fibra  $l_c$ .

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i}, \quad (16-9)$$



**FIGURA 16-11** Al incrementar la longitud de las fibras recortadas de vidrio E en una matriz epóxica aumenta la resistencia del compuesto. En este ejemplo, la fracción en volumen de las fibras de vidrio es aproximadamente de 0.5.

donde  $\sigma_f$  es la resistencia de la fibra y  $\tau_i$  está relacionado con la resistencia de la unión entre fibra y matriz o al esfuerzo al que la matriz se empieza a deformar. Si la longitud  $l$  de la fibra es menor que  $l_c$ , se observa poco efecto reforzante; si  $l$  es mayor que aproximadamente 15  $l_c$ , la fibra se comporta casi como si fuera continua. La resistencia del compuesto se puede estimar a partir de

$$\sigma_c = f_f \sigma_f \left( 1 - \frac{l_c}{2l} \right) + f_m \sigma_m, \quad (16-10)$$

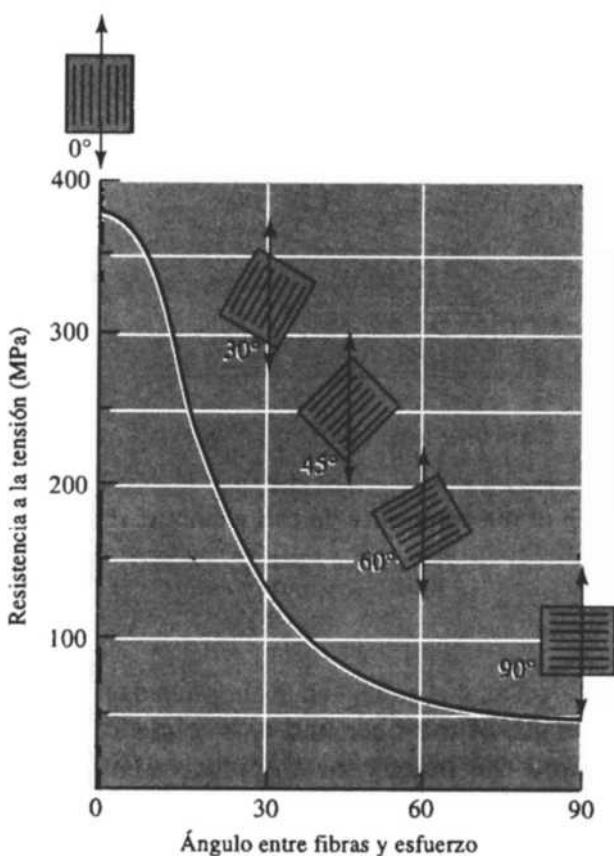
donde  $\sigma_m$  es el esfuerzo en la matriz al romperse las fibras.

**Cantidad de fibras** Una fracción mayor de volumen de fibras incrementa la resistencia y la rigidez del compuesto, como lo indica la regla de las mezclas. Sin embargo, la fracción máxima de volumen de fibras es aproximadamente 80 por ciento, más allá de esta cantidad las fibras ya no quedan totalmente rodeadas por la matriz.

**Orientación de las fibras** Las fibras de refuerzo pueden introducirse en la matriz con orientaciones diversas. Las fibras cortas con una orientación aleatoria y una relación de forma típicas en el compuesto reforzado con fibra de vidrio, se pueden introducir con facilidad en la matriz, dando un comportamiento relativamente isotrópico.

Los arreglos unidireccionales con fibras largas e incluso continuas producen propiedades anisotrópicas, con resistencia y rigidez paralelas a las fibras particularmente buenas. Estas fibras se denominan frecuentemente como capas de 0°, indicando que todas las fibras están alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado. Sin embargo, si la carga es perpendicular a las fibras, la orientación unidireccional origina propiedades pobres (figura 16-12).

Una de las características únicas de los compuestos reforzados con fibra es que sus propiedades se pueden diseñar para soportar condiciones de carga diferentes. En la matriz se pueden introducir fibras largas y continuas en varias direcciones (figura 16-13); mediante arreglos ortogonales (capas de 0°/90°) se obtienen buenas resistencias en dos direcciones perpendiculares.



**FIGURA 16-12** Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E.

res. Disposiciones más complejas (como capas de  $0^\circ/\pm(45^\circ/90^\circ)$ ) proporcionan refuerzo en varias direcciones.

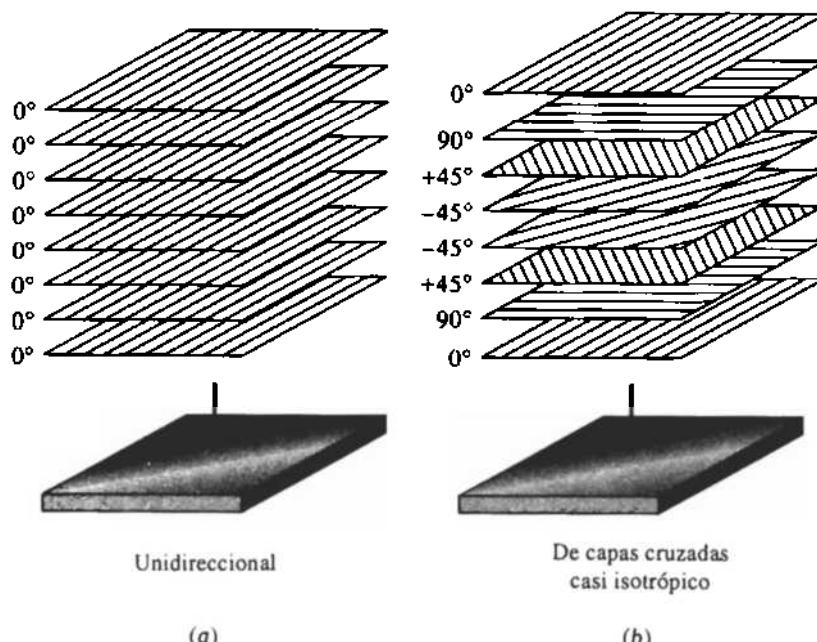
Las fibras también se pueden organizar en patrones tridimensionales. Incluso en el más simple de los tejidos, las fibras en cada capa de tela tienen un pequeño grado de orientación en una tercera dirección. Se logra un refuerzo tridimensional mayor, cuando las capas de tela están tejidas o cosidas entre sí. También se pueden utilizar tejidos tridimensionales más complejos (figura 16-14).

**Propiedades de las fibras** En la mayoría de los compuestos reforzados con fibras, éstas son resistentes, rígidas y de poco peso. Si el compuesto debe ser utilizado a temperaturas elevadas, también la fibra deberá tener una temperatura de fusión alta. Por lo que la **resistencia específica** y el **módulo específico** de la fibra son características importantes:

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\sigma_y}{\rho} \quad (16-11)$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho} \quad (16-12)$$

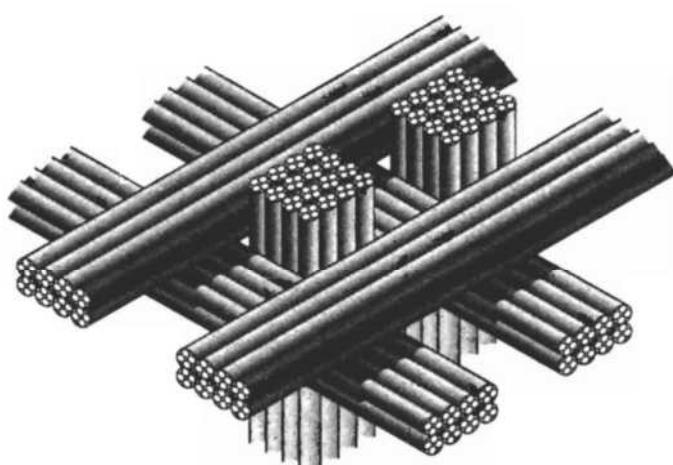
donde  $\sigma_y$  es el esfuerzo de cedencia,  $\rho$  la densidad y  $E$  el módulo de elasticidad. En la tabla 16-2 y en la figura 16-15 se muestran las propiedades de fibras típicas. Generalmente el módulo



**FIGURA 16-13** (a) Se pueden unir cintas que contienen fibras alineadas para producir una estructura compuesta unidireccional de varias capas. (b) Las cintas que contienen fibras alineadas se pueden unir con diferentes orientaciones para producir un compuesto casi isotrópico. En este caso, se forma un compuesto  $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ .

específico más alto se encuentra en materiales con número atómico bajo y enlace covalente, como el carbón y el boro. Estos dos elementos también tienen alta resistencia y alta temperatura de fusión.

Las fibras de aramidas, cuyo ejemplo más conocido es el Kevlar, son poliamidas aromáticas endurecidas con una estructura que contiene anillos de benceno (figura 16-16), y son ejemplos de polímeros líquido-cristalino en los cuales las cadenas poliméricas tienen forma de varilla muy rígida. También existen fibras de polietileno preparadas especialmente para refuerzo.



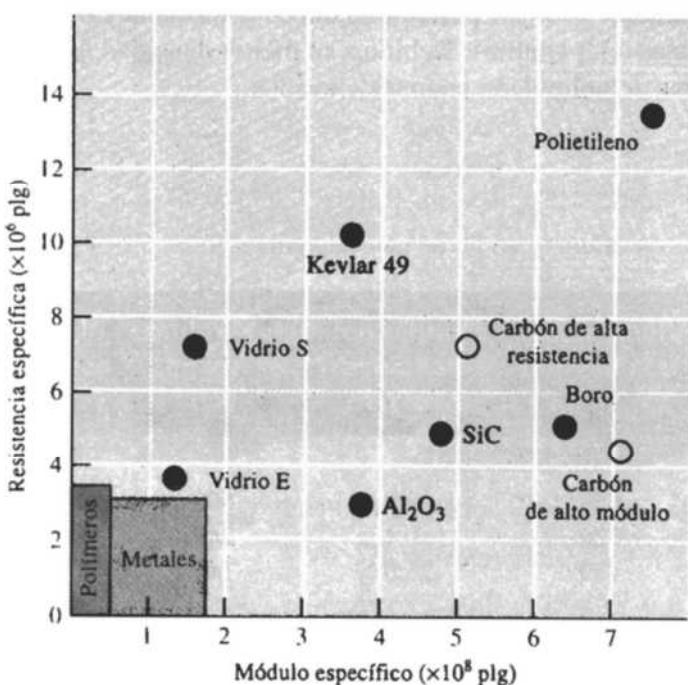
**FIGURA 16-14** Tejido tridimensional para compuestos reforzados con fibra.

Tanto las fibras de aramidas como de polietileno tienen resistencia y rigidez excelentes, pero su uso está limitado a bajas temperaturas. Debido a su menor densidad, la resistencia y el módulo específico de las fibras de polietileno son más elevados.

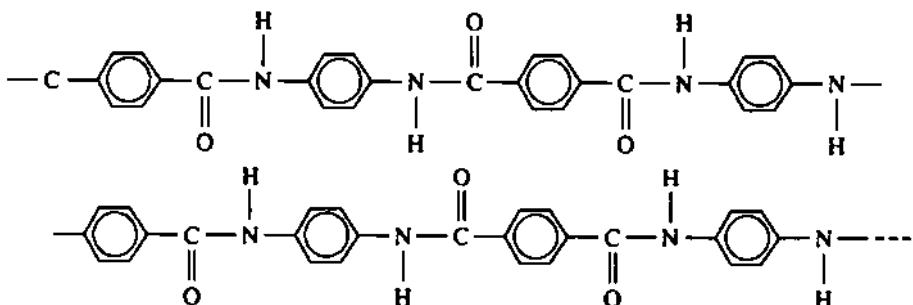
**TABLA 16-2 Propiedades de materiales de refuerzo en fibras seleccionadas**

| Material                       | Densidad<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Resistencia<br>a la tensión<br>(ksi) | Módulo de<br>elasticidad<br>(· 10 <sup>6</sup> psi) | Temperatura<br>de fusión<br>(°C) | Módulo<br>específico<br>(· 10 <sup>7</sup> plg) | Resistencia<br>específica<br>(· 10 <sup>6</sup> plg) |
|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---|----------------------------------|---|--|
| <b>Polímeros:</b>              |                                  |                                      |   |                                  |   |  |
| Kevlar                         | 1.44                             | 650                                  | 18.0  | 500                              | 34.7  | 10.1   |
| Nylon                          | 1.14                             | 120                                  | 0.4   | 249                              | 1.0   | 2.9  |
| Polietileno                    | 0.97                             | 480                                  | 25.0  | 147                              | 7.1   | 13.7   |
| <b>Metales:</b>                |                                  |                                      |   |                                  |   |  |
| Be                             | 1.83                             | 185                                  | 44.0  | 1277                             | 77.5  | 2.8  |
| Boro                           | 2.36                             | 500                                  | 55.0  | 2030                             | 64.7  | 4.7  |
| W                              | 19.40                            | 580                                  | 59.0  | 3410                             | 8.5   | 0.8  |
| <b>Vidrio:</b>                 |                                  |                                      |   |                                  |   |  |
| Vidrio E                       | 2.55                             | 500                                  | 10.5  | <1725                            | 11.4  | 5.6  |
| Vidrio S                       | 2.50                             | 650                                  | 12.6  | <1725                            | 14.0  | 7.2  |
| <b>Carbono:</b>                |                                  |                                      |   |                                  |   |  |
| HS (alta resistencia)          | 1.75                             | 820                                  | 40.0  | 3700                             | 63.5  | 13.0   |
| HM (alto módulo)               | 1.90                             | 270                                  | 77.0  | 3700                             | 112.0   | 3.9  |
| <b>Cerámicos:</b>              |                                  |                                      |   |                                  |   |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.95                             | 300                                  | 55.0  | 2015                             | 38.8  | 2.1  |
| B <sub>4</sub> C               | 2.36                             | 330                                  | 70.0  | 2450                             | 82.4  | 3.9  |
| SiC                            | 3.00                             | 570                                  | 70.0  | 2700                             | 47.3  | 5.3  |
| ZrO <sub>2</sub>               | 4.84                             | 300                                  | 50.0  | 2677                             | 28.6  | 1.7  |
| <b>Whiskers:</b>               |                                  |                                      |   |                                  |   |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.96                             | 3000                                 | 62.0  | 1982                             | 43.4  | 21.0   |
| Cr                             | 7.20                             | 1290                                 | 35.0  | 1890                             | 13.4  | 4.9  |
| Grafito                        | 1.66                             | 3000                                 | 102.0   | 3700                             | 170.0   | 50.2   |
| SiC                            | 3.18                             | 3000                                 | 70.0  | 2700                             | 60.8  | 26.2   |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | 3.18                             | 2000                                 | 55.0  |                                  | 47.8  | 17.5   |

Las fibras cerámicas y *whiskers*, incluyendo la alúmina, el vidrio y el carburo de silicio son resistentes y rígidos. Las fibras de vidrio, que son las de uso más común, incluyen sílice puro, vidrio S (SiO<sub>2</sub>-25% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-10% MgO) y vidrio E (SiO<sub>2</sub>-18% CaO-15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Aunque los materiales cerámicos son considerablemente más densos que las fibras poliméricas, pueden utilizarse a temperaturas mucho más altas. El berilio y el tungsteno, aunque estén unidos metálicamente, tienen un módulo alto, lo que los convierte en materiales de fibras atractivos para ciertas aplicaciones.



**FIGURA 16-15** Resistencia y módulo específicos de las fibras, en comparación con algunos metales y polímeros.



**FIGURA 16-16** Estructura del Kevlar. Las fibras están unidas por enlaces secundarios entre átomos de oxígeno y de hidrógeno de las cadenas adyacentes.

### EJEMPLO 16-9

### Diseño de un compuesto aerosespacial

Recientemente se está utilizando una aleación de aluminio 7075-T6 (con módulo de elasticidad de  $10 \times 10^6$  psi) para fabricar un panel de 500 lb de una aeronave comercial. La experiencia ha indicado que por cada libra de peso menos en la aeronave se reduce el consumo de combustible en 500 galones por año. Diseñe un material ligero para el panel que conserve el mismo módulo específico y que, por tanto, resulte económico a lo largo de los 10 años de vida útil de la aeronave.

### SOLUCIÓN

Existen muchos materiales posibles que se pueden utilizar para conseguir la disminución en el peso. Por ejemplo, se puede considerar una aleación Al-Li en la condición T6, reforzada con

fibras de boro. Tanto la fibra de boro como la adición de litio en la aleación incrementan el módulo de elasticidad; el boro y la aleación Al-Li también tienen menor densidad que las aleaciones típicas de aluminio.

El módulo específico de la aleación actual 7075-T6 es:

$$\begin{aligned}\text{Módulo específico} &= \frac{(10 \times 10^6 \text{ psi})}{(2.7 \text{ g/cm}^3)(2.54 \text{ cm/plg})^3/454 \text{ g/lb}} \\ &= 1.03 \times 10^8 \text{ in.}\end{aligned}$$

La densidad de las fibras de boro es de aproximadamente  $2.36 \text{ g/cm}^3$  ( $0.085 \text{ lb/plg}^3$ ) y la de una aleación típica Al-Li es de aproximadamente  $2.5 \text{ g/cm}^3$  ( $0.09 \text{ lb/plg}^3$ ). Si en el compuesto se utiliza una fracción en volumen de fibras de boro de 0.6 entonces la densidad, el módulo de elasticidad y el módulo específico del compuesto son

$$\rho_c = (0.6)(0.085) + (0.4)(0.09) = 0.087 \text{ lb/plg}^3$$

$$E_c = (0.6)(55 \times 10^6) + (0.4)(11 \times 10^6) = 37 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{37 \times 10^6}{0.087} = 4.25 \times 10^8 \text{ plg}$$

Si el módulo específico es el único factor que tiene influencia en el diseño del componente, podría reducirse el espesor de éste en un 75% y su peso sería entonces de 125 lb, en lugar de 500. El ahorro en peso sería entonces de 375 lb, es decir  $(500 \text{ gal/lb})(375 \text{ lb}) = 187,500 \text{ gal}$  por año. A dos dólares por galón, se obtendría un ahorro anual de combustible equivalente a 375 mil dólares, o sea, 3.75 millones de dólares durante los 10 años de vida útil de la aeronave.

Esto ciertamente es una comparación optimista, ya que ciertos factores de resistencia y de manufactura pudieran impedir que esta pieza se fabrique tan delgada como se sugiere. Además, el alto costo de las fibras de boro (superior a los 300 dólares por libra de peso) y un costo de manufactura del compuesto más elevado que el del aluminio 7075, reducirían los ahorros.

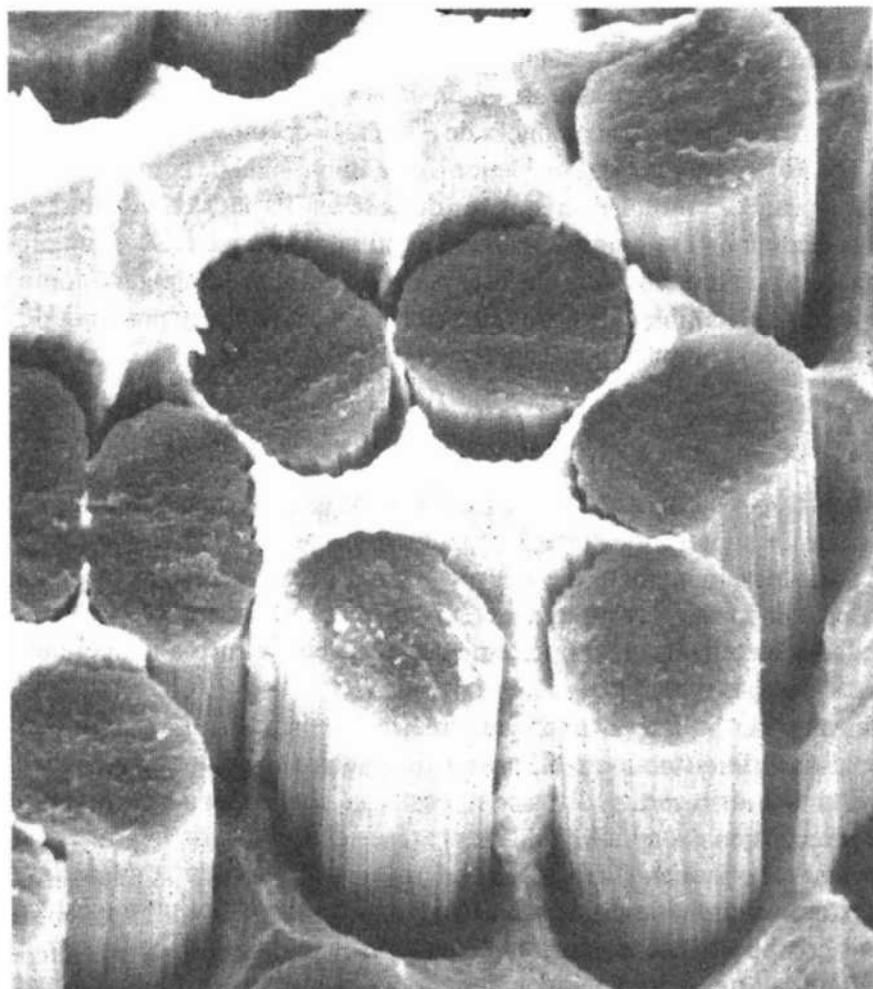
**Propiedades de las matrices** La matriz de un material compuesto soporta las fibras manteniéndolas en su posición correcta; transfiere la carga a las fibras fuertes, las protege de sufrir daños durante su manufactura y su uso y evitan la propagación de grietas en las fibras a todo lo largo del compuesto. La matriz, por lo general, es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.

Las matrices poliméricas son particularmente comunes. La mayoría de los polímeros, tanto termoplásticos como termoestables, están disponibles en grados correspondientes a reforzamiento con fibras de vidrio cortas. Estos compuestos se conforman en formas útiles mediante los procesos descritos en el capítulo 15. Los procesos de moldeo de láminas de compuestos (SMC) y de moldeo en volumen (BMC) son típicos de esta clase de compuestos. Para aplicaciones a temperaturas algo más altas se utilizan poliimidas aromáticas termoestables.

Los compuestos de matriz metálica incluyen aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos, reforzados con fibras cerámicas y metálicas. Mediante los compuestos con matriz metálica (MMC) se cubren una diversidad de aplicaciones aerospaciales y automotrices. La matriz metálica permite que el compuesto funcione a temperaturas altas, pero a menudo la producción de un compuesto resulta más difícil y costosa que la producción de materiales con matriz polimérica.

De manera sorprendente, en los compuestos se pueden utilizar como matriz materiales cerámicos frágiles. Los compuestos de matrices cerámicas tienen buenas propiedades a temperaturas elevadas y son más ligeros que los compuestos de matriz metálica de alta temperatura. En una sección posterior, se analizará cómo desarrollar la tenacidad en los compuestos de matriz cerámica (CMC).

**Unión y falla** Particularmente en los compuestos de matriz polimérica y metálica, debe obtenerse una buena unión entre los diversos constituyentes. Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz, si la carga debe transferirse correctamente de la matriz a las fibras. Si la unión es pobre, las fibras pueden salirse de la matriz durante la carga, reduciendo la resistencia y la resistencia a la fractura del compuesto. La figura 16-17 ilustra una unión pobre de fibras de carbono en una matriz de cobre. En algunos casos, para mejorar la unión se pueden utilizar recubrimientos especiales. Las fibras de vidrio se pueden recubrir con silano, un agente



**FIGURA 16-17** Microfotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de fractura de una aleación plata-cobre, reforzada con fibras de carbono. Una mala unión hace que gran parte de la superficie de la fractura siga la interfase entre la matriz de metal y las fibras de grafito ( $\times 3000$ ). (De Metals Handbook, American Society for Metals, Vol. 9, 9a. Ed., 1985.)

orgánico (conocido como **recubierta**) para mejorar la unión y la resistencia a la humedad en compuestos de fibra de vidrio. Similarmente, las fibras de carbono se recubren con un material orgánico para mejorar la unión. Se han recubierto fibras de boro con carburo de silicio o nitrógeno de boro para mejorar la unión con la matriz de aluminio; de hecho, a estas fibras se les llama fibras *Borsic* para indicar la presencia del recubrimiento de carburo de silicio (SiC).

Otra propiedad que debe tomarse en consideración al introducir fibras en una matriz es la similitud de los coeficientes de expansión térmica de ambos materiales. Si la fibra se expande y se contrae a una razón muy diferente a la de la matriz, las fibras se pueden romper, o la unión se destruye causando falla prematura.

En muchos compuestos, las capas o chapas individuales de "tejido" se unen. La unión entre estas capas también debe ser buena o puede ocurrir otro problema, la **delaminación**, esto es que las capas pueden separarse bajo carga y causar falla. Para evitar la delaminación se utilizan compuestos con tejido tridimensional.

## 16-6 Manufactura de fibras y compuestos

La producción de un compuesto reforzado con fibra implica varios pasos, incluyendo la producción de las fibras, su disposición en molotes o "tejidos", y su introducción en la matriz.

**Fabricación de las fibras** Las fibras metálicas, las fibras de vidrio y muchas fibras poliméricas (incluyendo el nylon, la aramida y el poliacrilonitrilo) se pueden formar por trefilado, según se describe en el capítulo 7 (estirado de alambre de metal) y en el capítulo 15 (utilizando la hiladora para fibras poliméricas).

El boro, el carbono y los productos cerámicos son demasiado frágiles y reactivos para poder ser trabajados mediante los procesos de trefilado convencionales. La fibra de boro se produce mediante **depósito químico en fase vapor** (CVD), figura 16-18(a). Como sustrato se utiliza un filamento de tungsteno caliente muy delgado que pasa a través de un sello a una cámara caliente. Los compuestos de boro vaporizados, como el  $\text{BCl}_3$ , se introducen en la cámara, se descomponen, permitiendo que el boro se precipite sobre el alambre de tungsteno (figura 16-19).

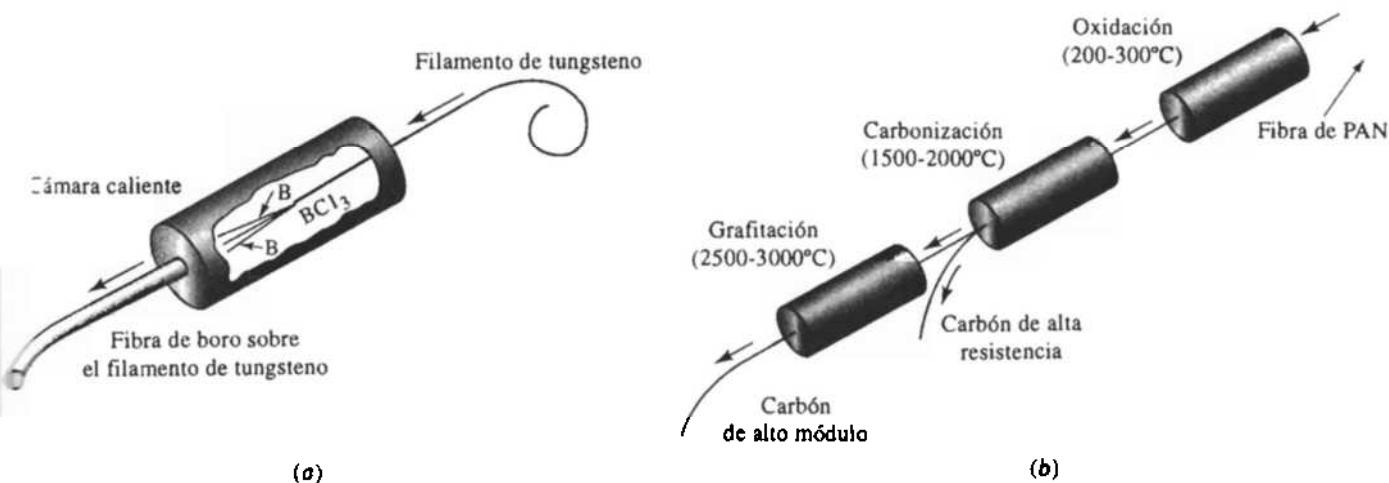
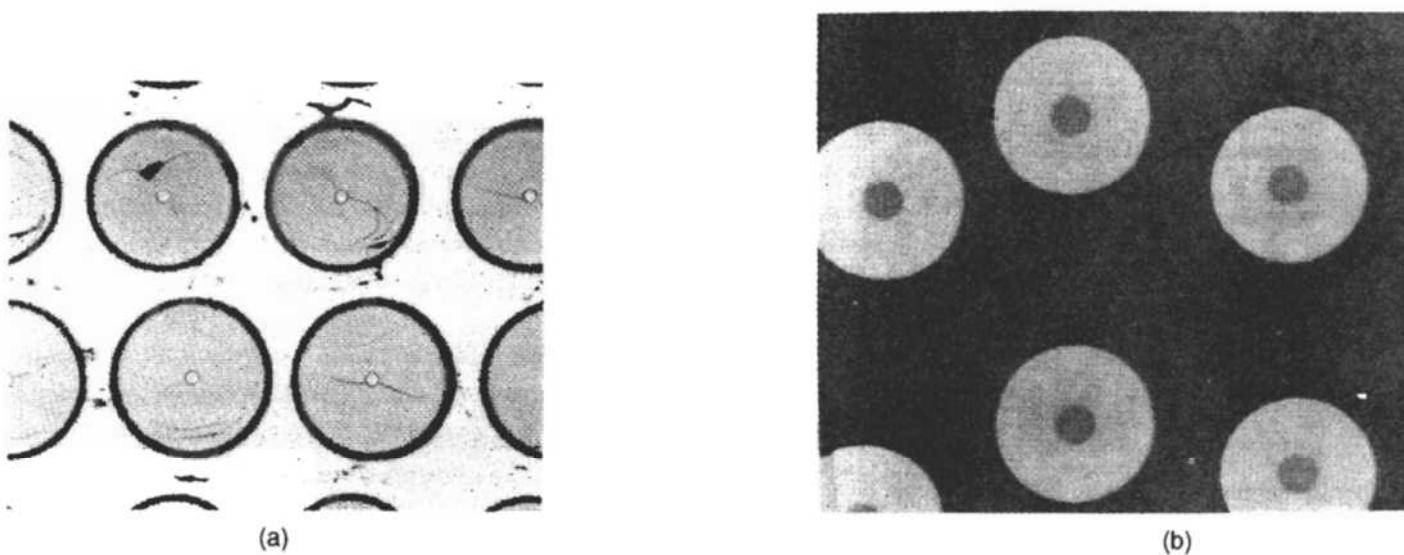


FIGURA 16-18 Métodos para producir (a) fibras de boro y (b) de carbono.



**FIGURA 16-19** Microfotografías de dos compuestos reforzados con fibras: (a) Aluminio reforzado con fibra de *Borsic*, donde las fibras están compuestas por una capa gruesa de boro depositada en un filamento de tungsteno de diámetro pequeño ( $\times 1000$ ). (De Metals Handbook, American Society for Metals, Vol. 9, 9a. Ed., 1985.) (b) En esta microestructura de un compuesto de matriz cerámica reforzado con fibra cerámica, se utilizan fibras de carburo de silicio para reforzar una matriz de nitruro de silicio. La fibra de SiC se deposita como vapor en un pequeño filamento precursor de carbono ( $\times 125$ ) (Cortesía de Dr. R. T. Bhatt, NASA Lewis Research Center.)

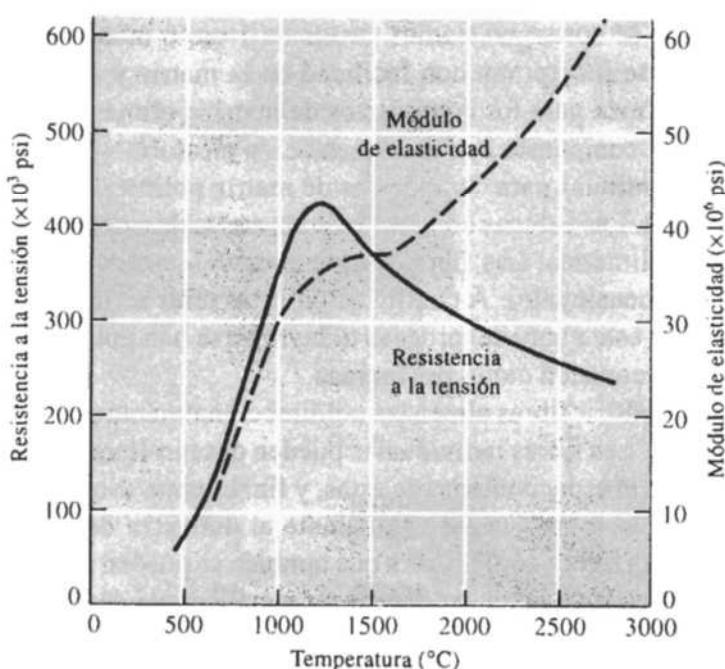
Las fibras de SiC se elaboran de manera similar, utilizando fibras de carbono como sustrato para el depósito de vapores de carburo de silicio.

Las fibras de carbono se fabrican mediante **carbonización** o **pirolización**, de un filamento orgánico, el cual es más fácil de estirar o hilar en tramos largos, delgados y continuos [figura 16-18(b)]. El filamento orgánico, conocido como **precursor**, frecuentemente es rayón (un polímero celulósico), poliacrilonitrilo (PAN) o resina (varios compuestos orgánicos aromáticos). Las altas temperaturas descomponen el polímero orgánico, extrayendo todos los elementos, excepto el carbono. Conforme se incrementa la temperatura de carbonización de 1000 a 3000°C la resistencia a la tensión se reduce, en tanto que el módulo de elasticidad aumenta (figura 16-20). El estirado de los filamentos de carbono en momentos críticos durante la carbonización puede producir orientaciones preferenciales deseables en el filamento final.

Los **whiskers** son cristales individuales, con relaciones de forma de 20 a 1000. Dado que los whiskers no contienen dislocaciones móviles, no puede ocurrir deslizamiento, por tanto poseen resistencias excepcionalmente altas.

Debido al complejo proceso requerido para la producción de fibras, su costo puede resultar bastante alto. La tabla 16-3 muestra costos aproximados de refuerzos de fibras comunes.

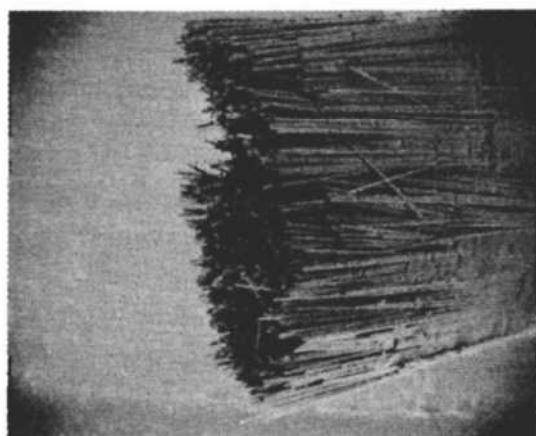
**Arreglo de las fibras** Filamentos excepcionalmente finos se reúnen en forma de hilados, hilos o mechas. En los **hilos** se retuercen unos 10,000 filamentos para producir la fibra. Una **mecha** contiene desde unos cuantos cientos hasta más de 100,000 filamentos sin retorcer (figura 16-21). Los **hilados** son paquetes de filamentos, de hilos o mechas sin retorcer.



**FIGURA 16-20** Efecto de la temperatura de tratamiento térmico sobre la resistencia y el módulo de elasticidad de las fibras de carbono.

**TABLA 16-3** Costo aproximado de fibras

| Fibra                          | Costo (Dollars/lb) |
|--------------------------------|--------------------|
| Boro                           | 320                |
| SiC                            | 100                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 30                 |
| Carbono                        | 30                 |
| Aramidas (Kevlar)              | 20                 |
| Vidrio E                       | 3                  |

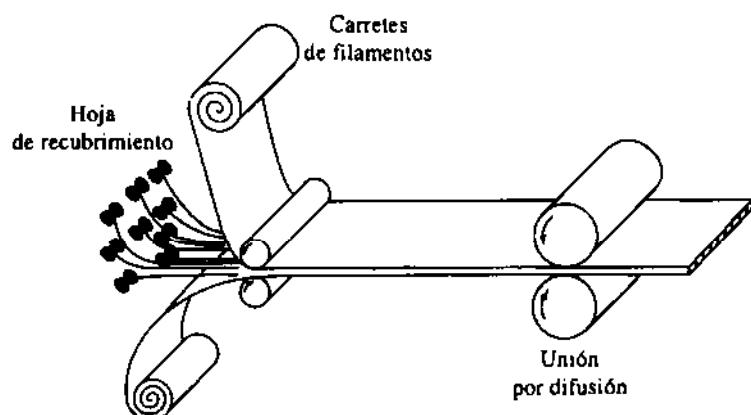


**FIGURA 16-21** Microfotografía por microscopía electrónica de barrido de una mecha de fibras de carbono, constituidas por muchos filamentos individuales de carbono ( $\times 200$ ).

A menudo, las fibras se cortan en tramos cortos de 1 cm o menos. Estas fibras, también conocidas como **hebras**, se incorporan con facilidad en la matriz y son típicas en moldeo de láminas y moldeo en volumen para los compuestos de matriz polimérica. Las fibras a menudo están presentes dentro del compuesto con una orientación aleatoria.

Las fibras largas y continuas para compuestos de matriz polimérica se pueden procesar en forma de esteras o de telas. Las **esteras** contienen fibras no tejidas, orientadas aleatoriamente y sujetas con una resina polimérica. Las fibras también pueden estar entrelazadas, prensadas o tejidas en telas bi o tridimensionales. A continuación estas telas se impregnan con una resina polimérica. Las resinas en este punto del proceso todavía no se han polymerizado completamente; estas esteras o telas se conocen como **preformas**.

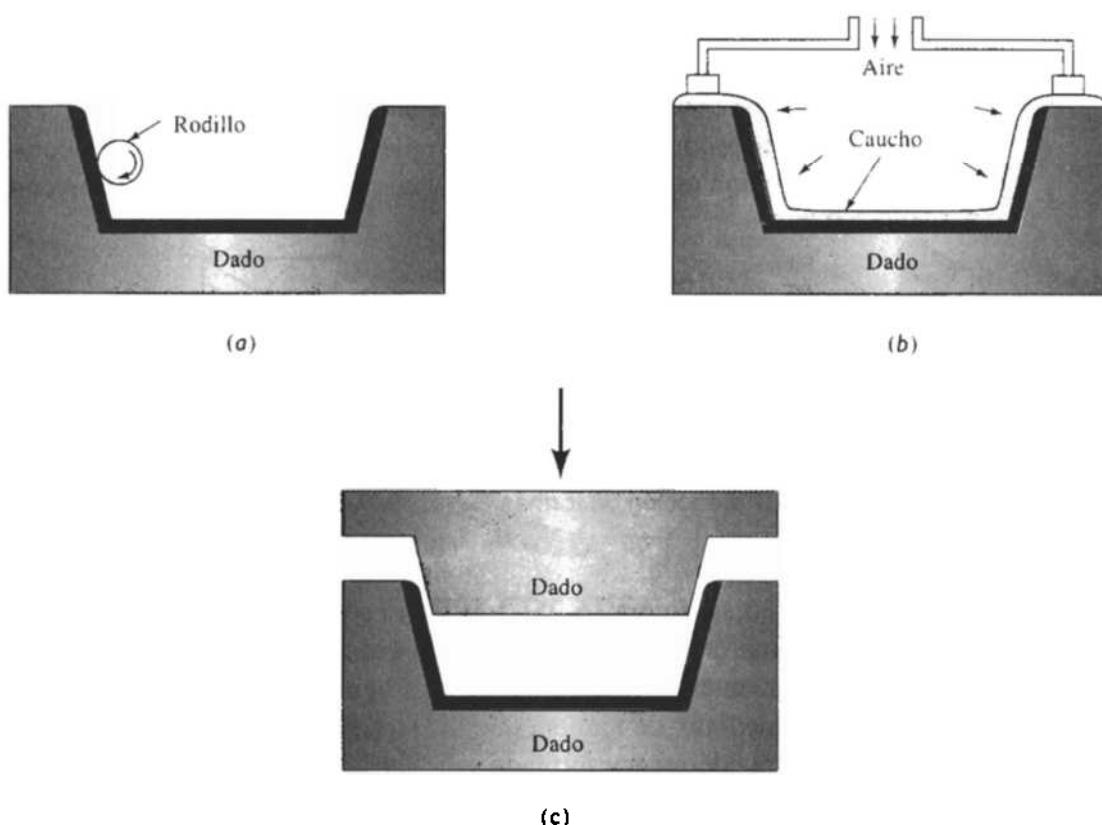
Cuando se deben introducir fibras alineadas unidireccionalmente en una matriz polimérica, se pueden producir **cintas**. Las fibras individuales pueden desenrollarse desde carretes sobre un mandril, el cual determina el espaciado de éstas, y finalmente son preformadas con resinas poliméricas. Estas cintas, con un espesor equivalente al diámetro de una fibra pueden tener hasta un ancho de 48 plg. La figura 16-22 ilustra que también se pueden producir cintas cubriendo las fibras por encima y por debajo con capas de hoja metálica que después se juntan mediante unión por difusión.



**FIGURA 16-22** Producción de cintas reforzadas con fibra, colocando fibras entre hojas metálicas y provocando la unión por difusión.

**Producción del compuesto** Se utilizan diversos métodos para la producción de piezas de compuestos, dependiendo de la aplicación y de los materiales. Los compuestos reforzados con fibras cortas normalmente se forman mezclando las fibras con una matriz líquida o plástica, y a continuación utilizando técnicas relativamente convencionales como el moldeo por inyección para compuestos en matriz polimérica o el vaciado para compuestos de matriz metálica. También se pueden producir compuestos de matriz polimérica utilizando un procedimiento de rociado, en el cual fibras cortas mezcladas con una resina se rocían contra un molde y luego se curan.

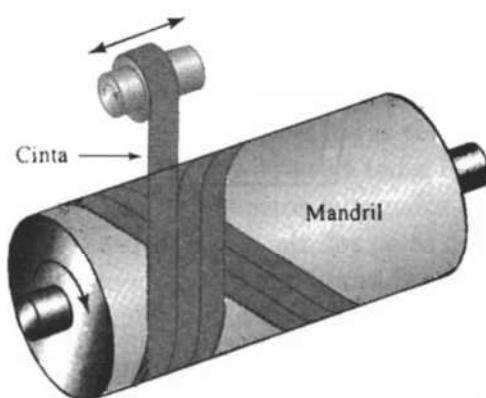
Sin embargo se han diseñado técnicas especiales para producir compuestos utilizando fibras continuas, ya sea con orientación unidireccional, de estera o de tela (figura 16-23). En técnicas de aplicación manual, las cintas, esteras o telas se colocan contra un molde, se saturan con una resina polimérica, y se presionan con rodillos para asegurar un buen contacto y eliminar la porosidad, y finalmente se curan. Carrocerías de fibra de vidrio para automóviles y camiones se pueden fabricar con este método que, generalmente, es lento y requiere de mucha mano de obra.



**FIGURA 16-23** Producción de formas de material compuesto en dados mediante (a) colocación a mano, (b) moldeo a presión y (c) moldeo con troqueles.

Las cintas y telas también se pueden colocar en un molde y conformarse mediante moldeo por bolsa. Para obligar a que se unan las capas individuales se introducen en el molde gases a alta presión o se provoca el vacío, de tal manera que se consiga una buena unión durante el curado. Con estas técnicas se han producido componentes de matriz polimérica de gran tamaño para los exteriores de las aeronaves militares. En el moldeo con troqueles macho y hembra, en uno de ellos se colocan fibras cortas o esteras. Al cerrarse el troquel, se obtiene la forma deseada.

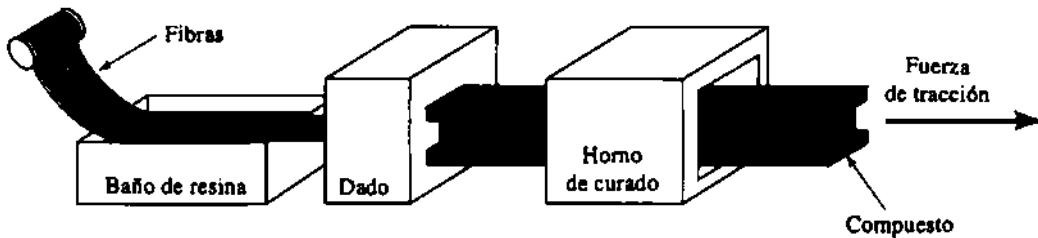
El **enrollado de filamentos** es un proceso para fabricar productos como recipientes a presión y piezas coladas para motores de cohetes (figura 16-24). Las fibras se enrollan alrededor de una forma o mandril, para formar gradualmente una figura sólida, que incluso puede tener un



**FIGURA 16-24** Producción de formas de materiales compuestos mediante enrollado de filamentos.

espesor de varios pies. El filamento puede estar sumergido en la resina de la matriz polimérica antes de embobinarse, o dicha resina se puede verter alrededor de la fibra durante el embobinado o después de él. El curado completa la producción de la pieza.

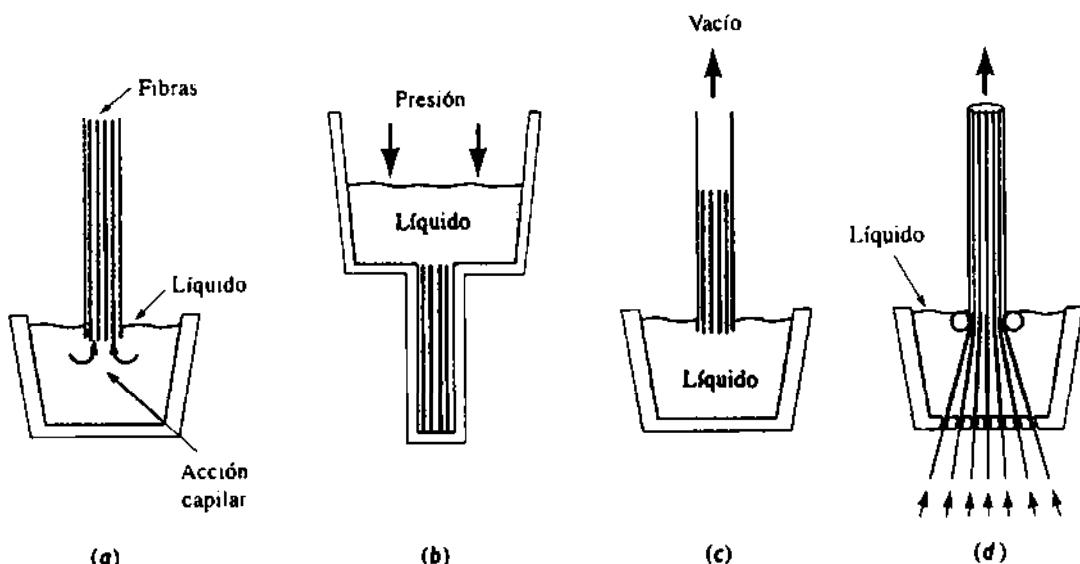
Para fabricar productos de formas simples y de secciones rectas constantes se utiliza el proceso de **extrusión estirado**. Las formas más comunes a producir son redondas, rectangulares,



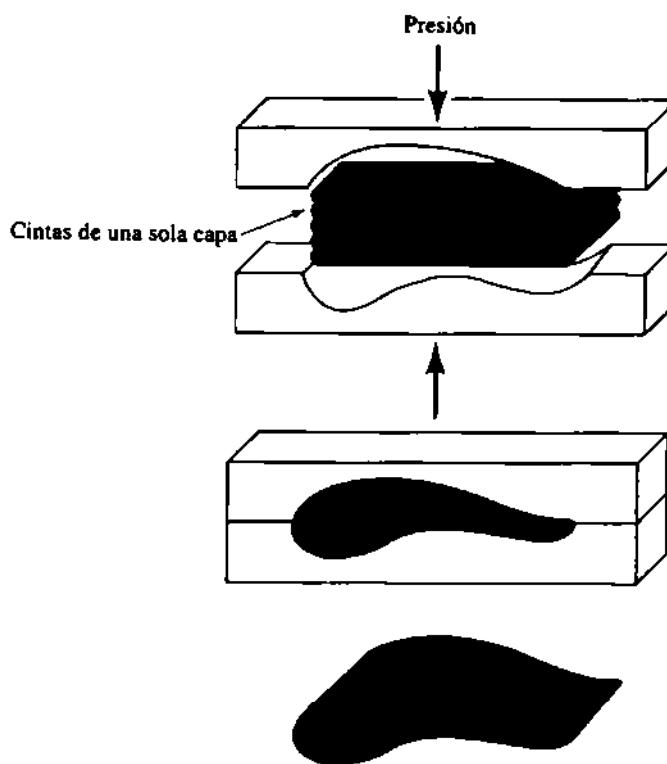
**FIGURA 16-25** Producción de formas de material compuesto por extrusión-estirado.

tubos, placas y hojas (figura 16-25). Las fibras o esteras son extraídas de carretes, pasadas por un baño de resina polimérica para su impregnación y unidas fuertemente para producir una forma particular, antes de entrar en un dado previamente calentado para su curado. La resina se cura casi de inmediato, de manera que las piezas se producen en forma continua. La materia prima extruida puede ser conformada subsecuentemente en partes algo más complejas, como cañas de pescar, palos de golf y bastones para esquí.

Los compuestos de matriz metálica con fibras continuas son más difíciles de producir que los compuestos de matriz polimérica. En la figura 16-26 aparecen ilustrados procesos de colado que obligan al líquido a "envolver las fibras"; estos métodos son elevación capilar, inyección a presión, infiltración por vacío y colada continua. También se pueden utilizar varios procesos de compactación en estado sólido. La figura 16-27 ilustra la forma en que varias cintas pueden ser colocadas y conformadas dentro de un troquel cerrado; la interdifusión entre tales cintas producirá una forma sólida.



**FIGURA 16-26** Técnicas de colado para producir materiales compuestos: (a) elevación capilar, (b) inyección a presión (c) infiltración por vacío y (d) colada continua.



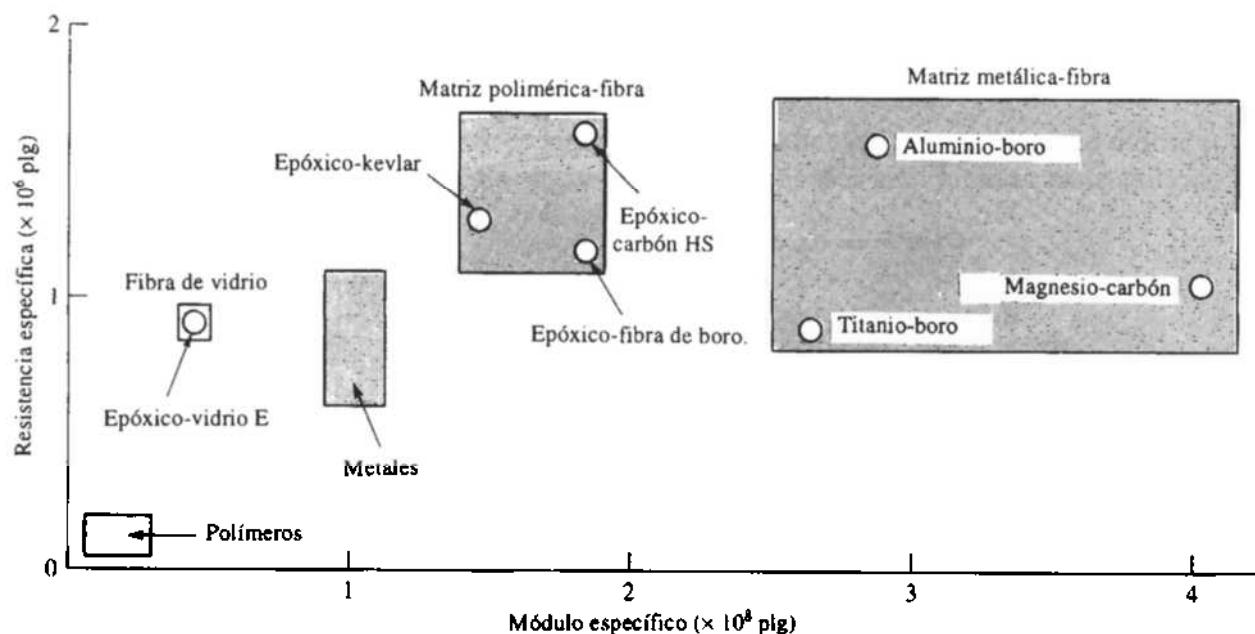
**FIGURA 16-27** Deformación y unión de un compuesto formado de varias cintas con un troquel cerrado.

## 16-7 Sistemas reforzados con fibras y sus aplicaciones

Antes de terminar el análisis de los compuestos reforzados por fibras, se verá el comportamiento y las aplicaciones de varios de los materiales más comunes. La figura 16-28 compara el módulo y resistencias específicas de varios compuestos con las correspondientes a metales y polímeros. Observe que los valores en esta figura son inferiores a los de la figura 16-15, ya que ahora se observa el compuesto y no sólo a la fibra.

**Compuestos avanzados** El término compuesto avanzado se utiliza a menudo cuando se pretende que el compuesto dé servicio en aplicaciones muy críticas, como en la industria aeroespacial (tabla 16-4). Los compuestos avanzados, por lo general, son compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras poliméricas, metálicas o cerámicas de alta resistencia. Donde se requiera una rigidez particularmente buena se utilizan mucho las fibras de carbono; las fibras de aramidas, y todavía más las de polietileno, son las más adecuadas para aplicaciones de alta resistencia donde la tenacidad y la resistencia a daños sean de máxima importancia. Desafortunadamente, a temperaturas relativamente bajas las fibras poliméricas pierden su resistencia, similar a lo que ocurre a todas las matrices poliméricas (figura 16-29).

Los compuestos avanzados también se utilizan con frecuencia para artículos deportivos. Las raquetas de tenis, los palos de golf, los esquíes, los bastones para esquí y las cañas de pescar a menudo contienen fibras de carbono o de aramida, ya que su alta rigidez proporciona un mejor rendimiento. En el caso de los palos de golf, las fibras de carbono permiten que exista un peso menor en el vástago y, por lo tanto, más peso en la cabeza. Para las velas ultraligeras de los yates de carrera se utilizan telas reforzadas con fibras de polietileno.



**FIGURA 16-28** Comparación del módulo y resistencia específicas de varios materiales compuestos con los correspondientes a metales y polímeros.

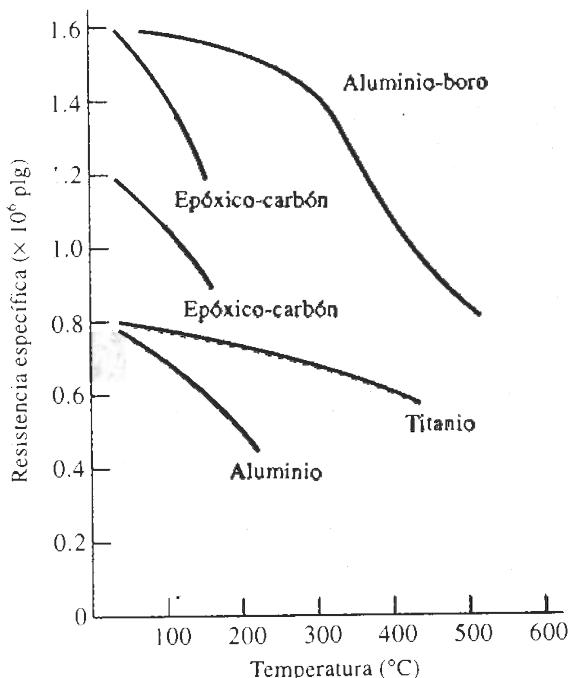
Una aplicación única de los compuestos de fibras de aramidas es el blindaje. Los compuestos de Kevlar de alta tenacidad proporcionan una protección balística superior a otros materiales, lo que los hace adecuados para ropa ligera y flexible a prueba de balas.

Los compuestos híbridos están formados por dos o más tipos de fibras. Por ejemplo, las fibras de Kevlar pueden mezclarse con fibras de carbono, para mejorar la tenacidad de un compuesto rígido o se puede mezclar el Kevlar con fibras de vidrio para mejorar la rigidez. Al controlar la cantidad y orientación de cada una de las fibras se puede lograr un buen compuesto para cumplir las necesidades de aplicaciones específicas.

También se pueden producir compuestos tenaces si se tiene especial cuidado en la selección de materiales y de técnicas de proceso. Se puede mejorar la tenacidad a la fractura de los compuestos frágiles utilizando fibras largas y amorfas (como el PEEK y el PPS), en vez de usar matrices cristalinas o con ligamentos cruzados, matrices elastoméricas termoplásticas o polímeros de red interpenetrante.

**TABLA 16-4** Ejemplos de materiales reforzados con fibras y sus aplicaciones

| Material         | Aplicaciones   |
|------------------|--|
| Aluminio-boro    | Aspas de ventilador en motores, otras aplicaciones en aeronaves y en la industria aeroespacial   |
| Epóxico-kevlar   | Aeronaves, aplicaciones aeroespaciales (incluyendo el transbordador espacial), cascos de barcos, artículos deportivos (incluyendo raquetas de tenis, palos de golf, cañas de pescar), chalecos antibalas |
| Poliéster-kevlar | Aplicaciones aeroespaciales y automotrices, artículos deportivos   |
| Polímero-grafito | Aplicaciones automotrices ligeras, aplicaciones para agua dulce y agua de mar, aplicaciones resistentes a la corrosión, artículos deportivos, componentes de aeronaves y aeroespaciales                  |
| Polímero-vidrio  |  |



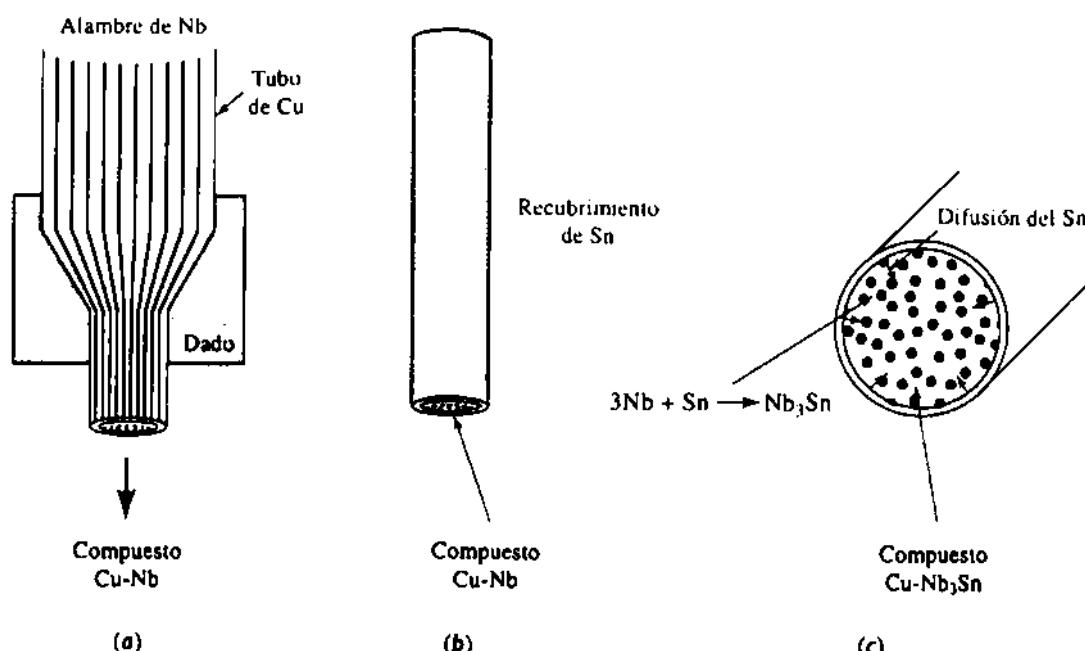
**FIGURA 16-29** Resistencia específica en función de la temperatura, para varios compuestos y metales.

**Compuestos de matriz metálica** Estos materiales, reforzados con fibras metálicas o cerámicas, proporcionan resistencia a alta temperatura. El aluminio reforzado con fibras de *Borsic* ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones aerospaciales, incluyendo puntales para el transbordador espacial. Se han reforzado aleaciones basadas en cobre con fibras de SiC, produciendo hélices de alta resistencia para barcos.

En los compuestos de matriz metálica se utiliza comúnmente el aluminio. En algunos motores diesel las fibras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  refuerzan los pistones; en algunas aplicaciones aerospaciales se utilizan fibras y *whiskers* de SiC, incluyendo aletas y refuerzos a la estructura de misiles; y las fibras de carbono refuerzan el mástil de la antena de aluminio del telescopio Hubble. Las fibras poliméricas, debido a sus bajas temperaturas de fusión o de degradación, normalmente no son utilizadas en matriz metálica. Sin embargo los *polymets* se producen extruyendo en caliente polvo de aluminio y polímeros cristalinos líquidos de alta temperatura de fusión. Una reducción de mil a uno durante el proceso de extrusión alarga el polímero en filamentos alineados y une las partículas de polvo de aluminio en una matriz sólida.

Los compuestos de matriz metálica pueden encontrar aplicaciones de importancia en componentes para turborreactores y cohetes. Las superaleaciones reforzadas con fibras metálicas (como el tungsteno) o con fibras cerámicas (como el SiC o el  $\text{B}_4\text{N}$ ) conservan su resistencia a altas temperaturas, permitiendo que los turborreactores operen con mayor eficiencia. Similarmente, el titanio y los aluminuros de titanio reforzados con fibras de SiC se están tomando en consideración para álabes y discos de turbina.

Una aplicación única para compuestos de matriz metálica es el alambre superconductor, que se requiere en los reactores de fusión. El compuesto intermetálico  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  tiene buenas propiedades superconductoras, pero es muy frágil. Para producir alambre de  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , un alambre de niobio puro es recubierto de cobre formando con los dos metales un alambre compuesto (figura 16-30). A continuación el alambre de material compuesto niobio-cobre se recubre de estaño. El estaño se difunde a través del cobre, reaccionando con el niobio para producir el compuesto intermetálico. También se utilizan sistemas niobio-titanio.

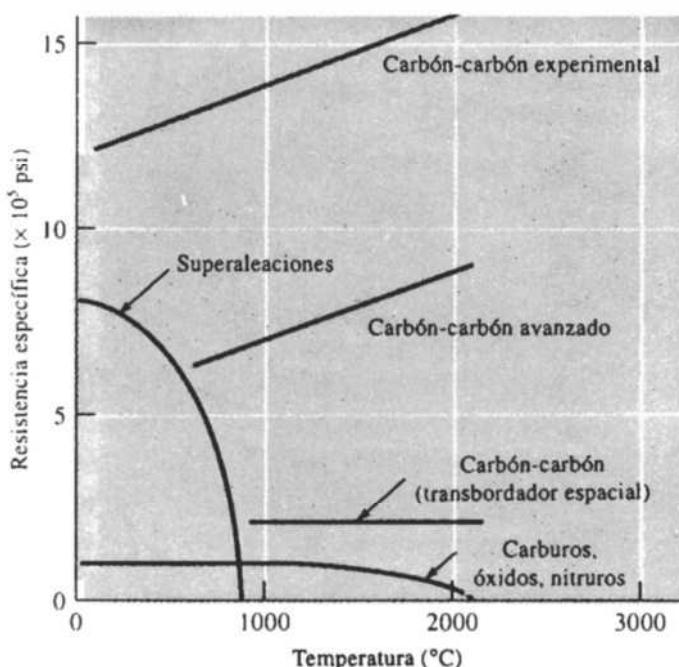


**FIGURA 16-30** Manufactura de alambres superconductores compuestos: (a) durante el formado el alambre de niobio es rodeado de cobre. (b) El alambre de material compuesto Nb-Cu se recubre de estaño. (c) El estaño se difunde hacia el niobio, produciendo el compuesto  $\text{Nb}_3\text{Sn}-\text{Cu}$ .

**Compuestos de matriz cerámica** También se está encontrando uso para compuestos que contienen fibras cerámicas en una matriz cerámica. Para ilustrar las propiedades únicas que se pueden obtener de estos materiales se analizarán dos aplicaciones de importancia.

Los compuestos carbono-carbono se utilizan para obtener una extraordinaria resistencia a la temperatura en aplicaciones aerospaciales. Estos compuestos pueden operar a temperaturas de hasta  $3000^\circ\text{C}$  y, de hecho, son más resistentes a altas temperaturas que a bajas temperaturas (figura 16-31). Los compuestos carbono-carbono se fabrican formando un tejido de poliacrilonitrilo o de fibra de carbono en un molde, y a continuación impregnándolo con una resina orgánica como la resina fenólica. La pieza se piroliza para convertir la resina fenólica en carbono. El compuesto, que todavía está blando y poroso, se impregna y piroliza varias veces más, incrementando de manera continua su densidad, resistencia y rigidez. Finalmente la pieza se recubre con carburo de silicio, para proteger el compuesto carbono-carbono contra la oxidación. Se pueden obtener resistencias de  $300,000$  psi y una rigidez de  $50 \times 10^6$  psi. Estos compuestos se han utilizado como conos de nariz y primero, bordes de vehículos aerospaciales de alto rendimiento como el transbordador espacial, o como discos de freno en vehículos de carretera y en aeronaves comerciales a reacción.

Los compuestos de matriz cerámica-fibra cerámica han obtenido una mejor resistencia y tenacidad a la fractura en comparación con productos cerámicos convencionales (tabla 16-5). Los refuerzos de fibra mejoran de varias maneras la tenacidad de la matriz cerámica. Primero, una grieta que se mueve a través de la matriz encuentra una fibra; si la unión entre la matriz y la fibra no es buena, la grieta se ve obligada a propagarse alrededor de la fibra, a fin de continuar el proceso de fractura. Además, una mala unión permite que la fibra empiece a separarse de la

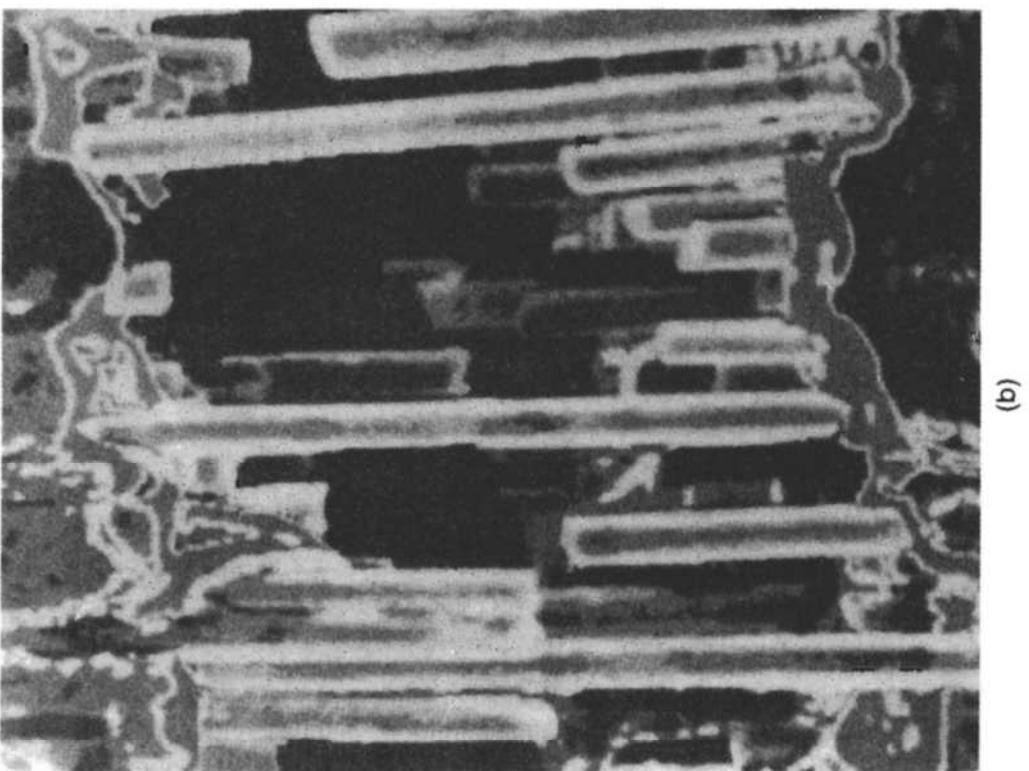


**FIGURA 16-31** Resistencia específica de varios compuestos carbono-carbono comparada con la de otros materiales resistentes a altas temperaturas, en función de la temperatura.

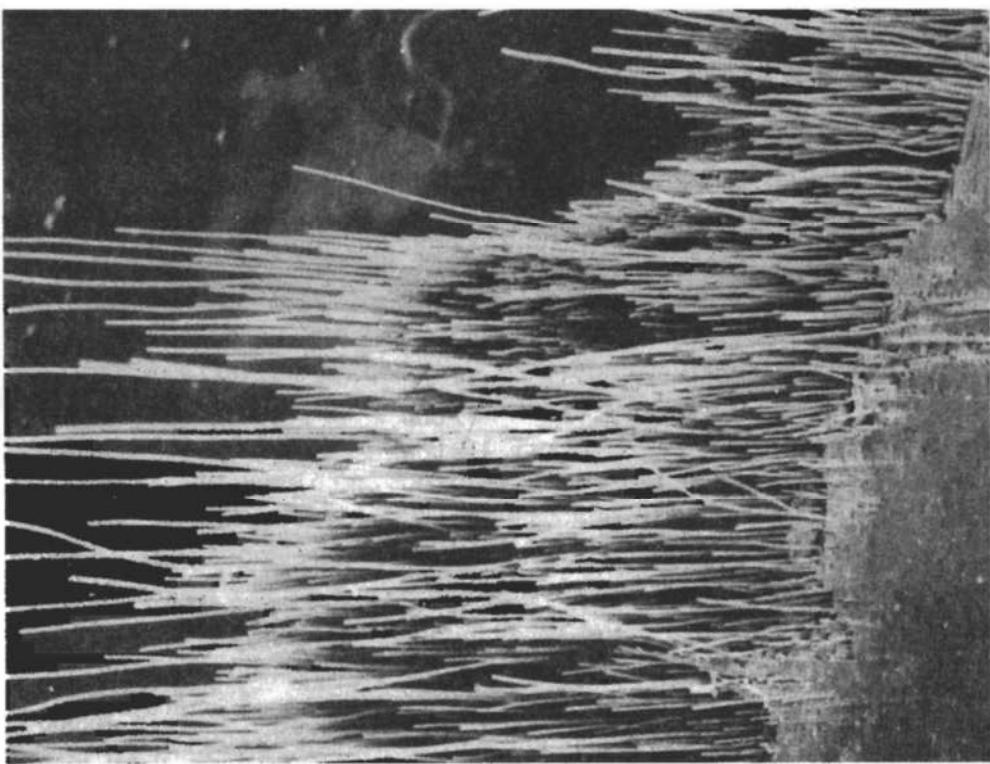
matriz [figura 16-32(a)]. Ambos procesos consumen energía, incrementando, por lo tanto, la tenacidad a la fractura. Finalmente, al iniciarse la grieta en la matriz, fibras aún no rotas pueden formar un puente sobre la grieta, proporcionando un esfuerzo compresivo, que evita que la grieta se abra [figura 16-32(b)].

**TABLA 16-5** Efecto de las fibras de refuerzo de SiC en las propiedades de materiales cerámicos seleccionados

| Material                           | Resistencia a la flexión<br>(psi) | Tenacidad a la fractura<br>(psi · plg) |
|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$            | 80,000                            | 5,000                                  |
| $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ | 115,000                           | 8,000                                  |
| $\text{SiC}$                       | 72,000                            | 4,000                                  |
| $\text{SiC/SiC}$                   | 110,000                           | 23,000                                 |
| $\text{ZrO}_2$                     | 30,000                            | 5,000                                  |
| $\text{ZrO}_2/\text{SiC}$          | 65,000                            | 20,200                                 |
| $\text{Si}_3\text{N}_4$            | 68,000                            | 4,000                                  |
| $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ | 115,000                           | 51,000                                 |
| Vidrio                             | 9,000                             | 1,000                                  |
| Vidrio/SiC                         | 120,000                           | 17,000                                 |
| Vidrio cerámico                    | 30,000                            | 2,000                                  |
| Vidrio cerámico/SiC                | 120,000                           | 16,000                                 |



(b)



(a)

**FIGURA 16-32** Dos formas de falla de compuestos cerámico-cerámico: (a) extracción de las fibras de SiC en una matriz de vidrio, dando al compuesto buena tenacidad ( $\times 20$ ). (De Metal Handbook, American Society for Metals, Vol. 9, 9a. Ed., 1985.) (b) Puentes de algunas fibras a través de una grieta, mejorando la tenacidad del compuesto de matriz cerámica (ampliación desconocida). (De Journal of Metals, Mayo 1991.)

A diferencia de los compuestos de matriz polimérica y metálica, es necesaria una mala unión en vez de una buena. En consecuencia, es vital el control de la estructura de la interfase. En un vidrio cerámico (basado en  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Li}_2\text{O}$ ) reforzado con fibras de SiC, se produce una interfase que contiene carbono y NbC, lo que facilita la separación entre fibra y matriz. Sin embargo, si el compuesto se calienta a temperatura elevada, la interfase se oxida; el óxido ocupa un gran volumen, ejerciendo una fuerza de compresión sobre la fibra, lo cual evita su fácil extracción. Así la tenacidad a la fractura se reduce.

**EJEMPLO 16-10****Diseño de un puntal de material compuesto**

Diseñe un puntal de matriz epóxica reforzado con fibras unidireccionales, que tenga una sección transversal redonda. El puntal tiene 10 pies de largo y cuando se le aplica una fuerza de 500 lb. no debe estirarse más de 0.10 plg. Debe asegurarse de que el esfuerzo que actúa sobre el puntal sea menor que el esfuerzo de cedencia de la matriz epóxica: 12,000 psi. Si las fibras se rompieran, el puntal se estiraría adicionalmente, pero no se fracturaría de manera catastrófica. El epóxico cuesta aproximadamente 0.80 dólares/lb y tiene un módulo de elasticidad de 500,000 psi.

**SOLUCIÓN**

Suponga que el puntal se fabricara totalmente de material epóxico (esto es, sin fibras)

$$\epsilon_{\max} = \frac{0.10 \text{ plg}}{120 \text{ plg}} = 0.00083 \text{ plg/plg}$$

$$\sigma_{\max} = E\epsilon = (500,000)(0.00083) = 415 \text{ psi}$$

$$A_{\text{puntal}} = \frac{F}{\sigma} = \frac{500}{415} = 1.2 \text{ plg}^2 \quad \text{o} \quad d = 1.24 \text{ plg}$$

Dado que  $\rho_{\text{epóxico}} = 1.25 \text{ g/cm}^3 = 0.0451 \text{ lbs/plg}^3$

$$\text{Peso}_{\text{puntal}} = (0.0451)(\pi)(1.24/2)^2(120) = 6.54 \text{ lb}$$

$$\text{Costo}_{\text{puntal}} = (6.54 \text{ lb})(\$0.80/\text{lb}) = \$5.23$$

Sin refuerzo, el puntal es grande y pesado y su costo es alto en vista de la gran cantidad de material epóxico necesario.

En un compuesto, la deformación máxima sigue siendo 0.00083 plg/plg. Si se hace el puntal tan pequeño como sea posible, es decir que opere a 12,000 psi, entonces el módulo de elasticidad mínimo  $E_c$  del compuesto es

$$E_c > \frac{\sigma}{\epsilon_{\max}} = \frac{12,000}{0.00083} = 14.5 \times 10^6 \text{ psi}$$

Existen varios sistemas compuestos posibles. El módulo de la fibra de vidrio es menor de  $14.5 \times 10^6 \text{ psi}$ ; por lo que el refuerzo de vidrio no es una posible elección.

Para fibras de carbono de alto módulo  $E = 77 \times 10^6 \text{ psi}$ , su densidad es  $1.9 \text{ g/cm}^3 = 0.0686 \text{ lb/plg}^3$  y el costo es de aproximadamente \$30/lb. La fracción volumétrica mínima de las fibras

de carbono necesarias para dar un módulo compuesto de  $14.5 \times 10^6$  psi es

$$E_c = f_c(77 \times 10^6) + (1 - f_c)(0.5 \times 10^6) > 14.5 \times 10^6$$

$$f_c = 0.183$$

La fracción volumétrica del material epóxico que resta es de 0.817. Un área de 0.817 veces el área transversal total del puntal debe soportar una carga de 500 lb con no más de 12,000 psi en caso de que las fibras fallen

$$A_{\text{epóxico}} = 0.817_{\text{total}} = \frac{F}{\sigma} = \frac{500 \text{ lb}}{12,000 \text{ psi}} = 0.0416 \text{ plg}^2$$

$$A_{\text{total}} = \frac{0.0416}{0.817} = 0.051 \text{ plg}^2 \quad \text{o} \quad d = 0.255 \text{ plg}$$

$$\text{Volumen}_{\text{puntal}} = A_{\text{total}} = (0.051 \text{ plg}^2)(120 \text{ plg}) = 6.12 \text{ plg}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Peso}_{\text{puntal}} &= \rho V = [(0.0686)(0.183) + (0.0451)(0.817)](6.12) \\ &= 0.302 \text{ lb} \end{aligned}$$

$$\text{Fracción en peso del carbón} = \frac{(0.183)(1.9 \text{ g/cm}^3)}{(0.183)(1.9) + (0.817)(1.25)} = 0.254$$

$$\text{Peso del carbón} = (0.254)(0.302 \text{ lb}) = 0.077$$

$$\text{Peso del material epóxico} = (0.746)(0.302 \text{ lb}) = 0.225$$

$$\text{Costo}_{\text{puntal}} = (0.077)(\$30) + (0.225)(\$0.80) = \$2.49$$

El puntal reforzado con fibras de carbono tiene menos de la cuarta parte del diámetro de una estructura totalmente epólica, con sólo el 5% del peso y la mitad del costo.

También se pueden repetir estos cálculos utilizando fibras de Kevlar, con un módulo de  $18 \times 10^6$  psi, una densidad de  $1.44 \text{ g/cm}^3 = 0.052 \text{ lb/plg}^3$  y un costo de aproximadamente 20 dólares/lb. Al hacerlo, se encuentra que es necesaria una fracción de volumen de fibras de 0.8, lo máximo que se puede incorporar en una matriz. También se obtendría que el diámetro requerido del puntal es de 0.515 plg y que el puntal pesa 1.263 lb, costando \$20.94 dólares. El módulo del Kevlar no es lo suficientemente alto para contrarrestar este alto costo.

Aunque las fibras de carbono son las más costosas, permiten obtener un menor peso y el puntal tendría el costo más bajo de material. (Este cálculo no toma en consideración el costo de fabricación del puntal.) Por tanto, el diseño sería de un puntal de 0.255 plg de diámetro, con una fracción volumétrica de fibras de carbono de alto módulo de 0.183.

## 16-8 Materiales compuestos laminares

Los compuestos laminados incluyen recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos metálicos, bimetálicos, laminados y todo un conjunto de aplicaciones. Además, los compuestos reforzados con fibras, producidos a partir de cintas o tejidos se pueden considerar parcialmente laminados. Muchos compuestos laminados están diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión conservando al mismo tiempo un bajo costo, alta resistencia o bajo peso. Otras características de importancia incluyen una resistencia superior al desgaste o a la abrasión, una mejor apariencia, así como características de expansión térmica poco usuales.

**Regla de las mezclas** Con la regla de las mezclas se pueden estimar algunas de las propiedades, paralelas a las laminillas de los materiales compuestos laminares. También se pueden calcular con poco margen de error, la densidad, la conductividad eléctrica y térmica, y el módulo de elasticidad.

$$\text{Densidad} = \rho_c = \sum f_i \rho_i$$

$$\text{Conductividad eléctrica} = \sigma_c = \sum f_i \sigma_i$$

$$\text{Conductividad térmica} = K_c = \sum f_i K_i$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = E_c = \sum f_i E_i$$

Los compuestos laminares tienen un comportamiento altamente anisotrópico. Las propiedades perpendiculares a las laminillas son

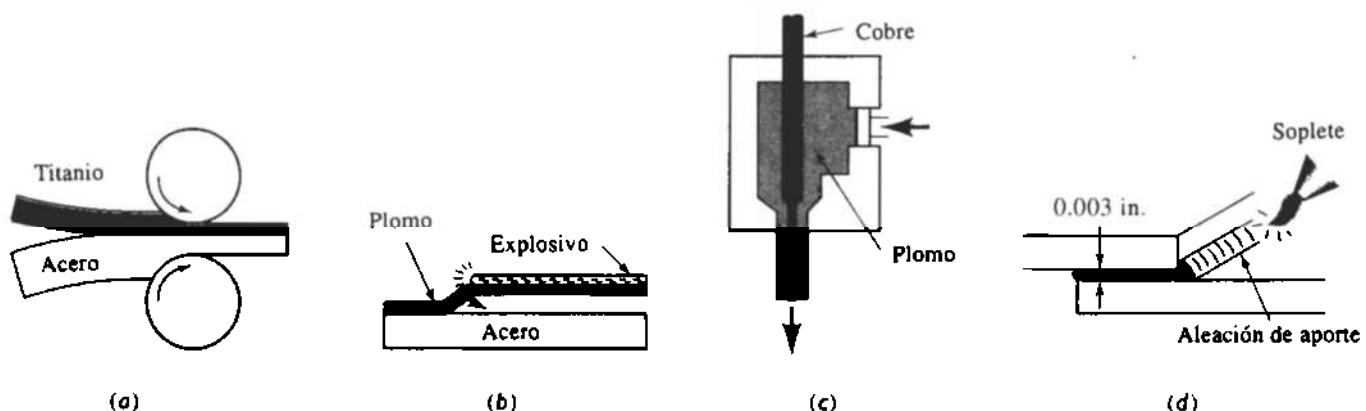
$$\text{Conductividad eléctrica} = \frac{1}{\sigma_c} = \sum \frac{f_i}{\sigma_i}$$

$$\text{Conductividad térmica} = \frac{1}{K_c} = \sum \frac{f_i}{K_i}$$

$$\text{Módulo de elasticidad} = \frac{1}{E_c} = \sum \frac{f_i}{E_i}$$

Sin embargo, muchas de las propiedades de verdadera importancia, como la resistencia a la corrosión y al desgaste, dependen primordialmente de un solo componente, por lo que la regla de las mezclas no es aplicable.

**Producción de compuestos laminares** Para producir compuestos laminares se utilizan varios métodos, incluyendo una diversidad de técnicas de deformación y de unión (figura 16-33).



**FIGURA 16-33** Técnicas para la producción de compuestos laminares: (a) unión por laminación, (b) unión por explosión, (c) coextrusión y (d) soldadura por capilaridad y difusión.

### EJEMPLO 16-11

Los capacitores utilizados para almacenar carga eléctrica esencialmente son compuestos laminares, elaborados con capas alternas de un conductor y un aislante (figura 16-34). Suponga



**FIGURA 16-34** Capacitor compuesto de capas alternas de aluminio y mica, como ejemplo de un compuesto laminar (para el ejemplo 16-11).

que se construye un capacitor a partir de 10 hojas de mica, cada una de ellas de 0.01 cm de espesor, y 11 hojas de aluminio, cada una de ellas de 0.0006 cm de espesor. La conductividad eléctrica del aluminio es de  $3.8 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  y la conductividad de la mica es de  $10^{-13} \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Determine la conductividad eléctrica del capacitor en las direcciones paralela y perpendicular a las hojas.

### SOLUCIÓN

Suponga que las placas del capacitor son de  $1 \text{ cm}^2$ . Entonces las fracciones en volumen son

$$V_{\text{Al}} = (11 \text{ hojas})(0.0006 \text{ cm})(1 \text{ cm}^2) = 0.0066 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{mica}} = (10 \text{ hojas})(0.01 \text{ cm})(1 \text{ cm}^2) = 0.1 \text{ cm}^3$$

$$f_{\text{Al}} = \frac{0.0066}{0.0066 + 0.1} = 0.062 \quad f_{\text{mica}} = \frac{0.1}{0.0066 + 0.1} = 0.938$$

*Paralela*

$$\sigma = (0.062)(3.8 \times 10^5) + (0.938)(10^{-13}) = 0.24 \times 10^5 \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

*Perpendicular*

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{0.062}{3.8 \times 10^5} + \frac{0.938}{10^{-13}} = 0.938 \times 10^{13}$$

$$\sigma = \frac{1}{0.938 \times 10^{13}} = 1.07 \times 10^{-13} \text{ ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$$

El compuesto, o capacitor, tiene una alta conductividad paralela a las placas, pero actúa como un aislante en dirección perpendicular a las mismas.

A menudo se unen capas individuales mediante *unión adhesiva* como en la producción del triplay o madera contrachapada. Los compuestos de matriz polimérica formados por varias capas de tejido o de cinta también se unen por cementación adhesiva; entre cada capa de preforma se coloca una película de polímero que no ha terminado de polimerizar. Al comprimirse las capas a una temperatura elevada, se termina la polimerización y las fibras preformadas se unen, para producir compuestos que pueden tener docenas de capas de espesor.

La mayoría de los compuestos laminares metálicos, como los revestimientos metálicos y los materiales bimetálicos, se producen mediante la *unión por deformación*, como la unión por laminación en caliente o en frío. La presión ejercida por los rodillos rompe la película de óxido

de la superficie, poniendo las superficies en contacto átomo con átomo, y permitiendo que ambas se unan. También se puede utilizar una unión explosiva. Una carga explosiva proporciona la presión requerida para la unión de los metales. Este proceso se utiliza particularmente para unir placas muy grandes que no caben en un tren de laminación.

Compuestos laminares muy sencillos, como el cable coaxial, se producen al coextruir dos materiales a través de un dado, de tal forma que el material blando rodee al más duro. De esta manera, se puede recubrir un alambre conductor metálico con un polímero termoplástico aislante.

La soldadura capilar puede unir placas compuestas. Las hojas metálicas, separadas por un espacio muy pequeño, de preferencia alrededor de 0.003 plg, se calientan por encima de la temperatura de fusión del material de aporte, el cual ya fundido es atraído por acción capilar hacia la unión.

## 16-9 Ejemplos y aplicaciones de compuestos laminares

El número de compuestos laminares es tan variado y tan numerosas sus aplicaciones e intenciones que no es posible efectuar generalizaciones en relación con su comportamiento. En lugar de eso, se examinarán las características de unos cuantos ejemplos de uso común.

**Laminados** Los laminados son capas de materiales unidos por un adhesivo orgánico. En el vidrio de seguridad, un adhesivo plástico, como el polivinil butiral une dos piezas de vidrio; el adhesivo impedirá que al romperse la pieza vuelen los fragmentos de vidrio. Los laminados se utilizan como aislamiento en motores, para tarjetas, para tableros de circuitos impresos y para elementos decorativos como muebles y cubiertas de Formica®.

Los *microlaminados* incluyen compuestos formados por capas alternas de hojas de aluminio y de polímero reforzado por fibras. El *Arall* (laminado de aramida y aluminio) y el *Glare* (laminado de vidrio y aluminio) se han desarrollado como posibles materiales para recubrimiento de aeronaves. En el Arall, una fibra de aramida como el Kevlar se prepara como tejido o cinta unidireccional, se impregna con un adhesivo y se lama entre capas de una aleación de aluminio (figura 16-35). El laminado compuesto tiene una combinación poco usual de resistencia, rigidez, resistencia a la corrosión y bajo peso. La resistencia a la fatiga se ha mejorado, ya que la interfase

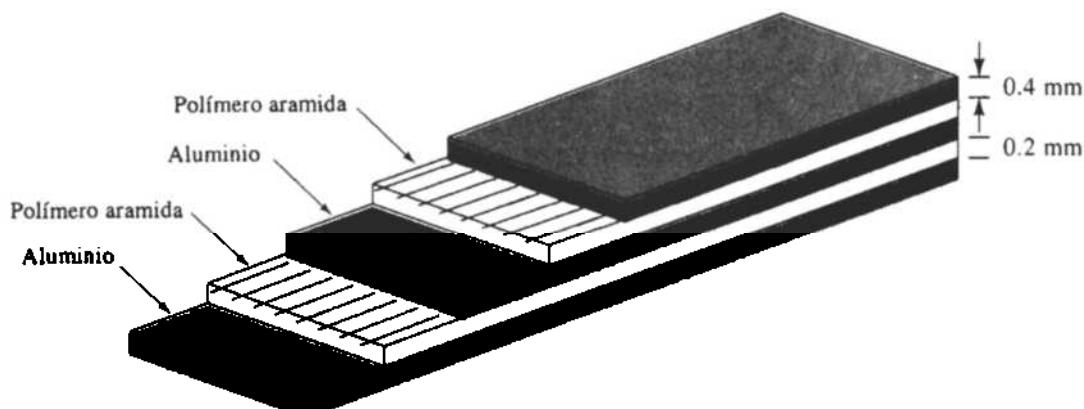


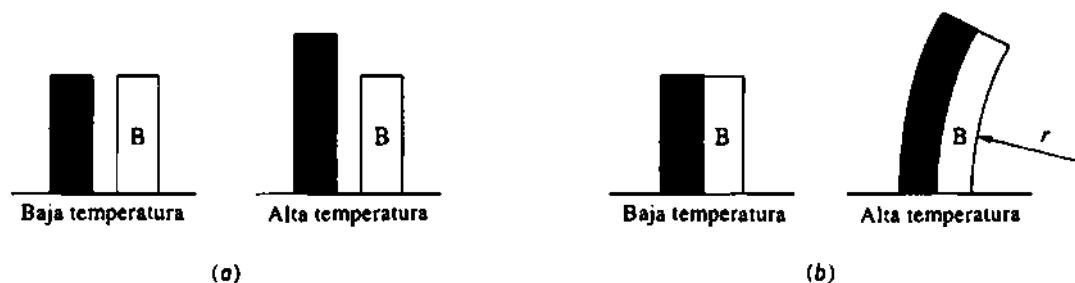
FIGURA 16-35 Diagrama esquemático de un laminado de aramida y aluminio, el Arall, que tiene buen potencial para aplicaciones aerospaciales.

entre capas puede bloquear las grietas. En comparación con los compuestos de matriz polimérica, los microlaminados tienen una buena resistencia a las descargas eléctricas de los relámpagos (importante en aplicaciones aerospaciales), son conformables, maquinables y de fácil reparación.

**Metales revestidos** Los materiales revestidos son compuestos metal-metal. Un ejemplo común de revestimiento metálico son las monedas de plata de Estados Unidos. Una aleación de Cu-80% Ni está unida en ambos lados a una aleación de Cu-20% Ni. La relación de espesor es de aproximadamente 1/6: 2/3: 1/6. La aleación de alto níquel tiene color plateado, en tanto que el núcleo, principalmente de cobre, tiene un bajo costo.

Los materiales revestidos dan una buena resistencia a la corrosión y tienen alta resistencia. El Alclad es un compuesto revestido en el cual se une el aluminio comercial puro con aleaciones de aluminio de resistencias más elevadas. El aluminio puro protege la aleación de alta resistencia contra la corrosión. El espesor de la capa de aluminio puro es de 1 a 15% del espesor total. El Alclad se utiliza en la construcción de aeronaves, de intercambiadores de calor, de edificios y de depósitos de almacenamiento, donde se desean combinaciones de resistencia a la corrosión, resistencia y poco peso.

**Bimetálicos** Los indicadores y controladores de temperatura aprovechan los diferentes coeficientes de expansión térmica de dos metales en un compuesto laminar. Si se calientan las dos piezas de metal, el que tenga mayor coeficiente de expansión térmica se hace más largo (figura 16-36). Si las dos piezas de metal están unidas rígidamente entre sí, la diferencia de coeficientes hace que la tira se doble produciendo una superficie curva. La cantidad de movimiento depende de la temperatura; midiendo la curvatura o la deflexión de la tira, se puede determinar la temperatura. Igualmente, si el extremo libre de la tira mueve un relevador, la tira puede conectar y desconectar un horno o un aire acondicionado y regular la temperatura.



**FIGURA 16-36** Efecto del coeficiente de expansión térmica en el comportamiento de los bimetálicos: (a) el incremento en la temperatura aumenta la longitud de un metal más que el otro. (b) Si ambos metales están unidos, la diferencia de expansión genera un radio de curvatura.

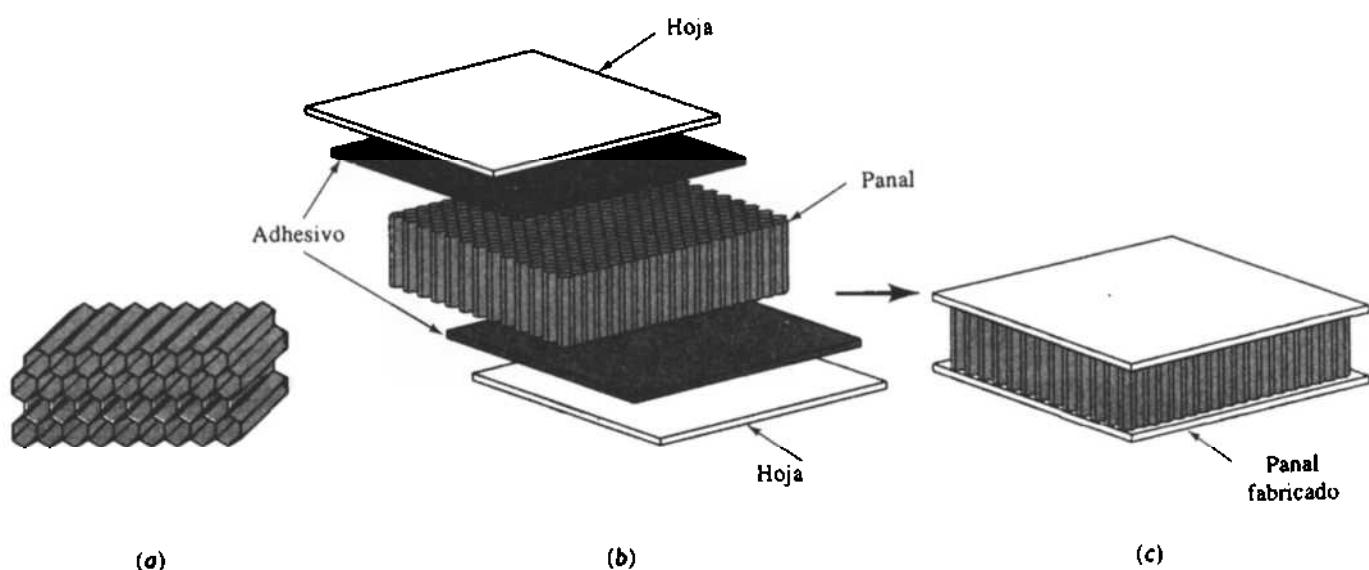
Los metales que se seleccionen para los bimetálicos deben tener (a) coeficientes de expansión térmica distintos, (b) características de expansión reversibles y repetibles y (c) un módulo de elasticidad alto, de manera que el dispositivo bimetalico pueda funcionar. Frecuentemente la tira de baja expansión se fabrica de Invar, una aleación hierro-níquel, en tanto que la tira de alta expansión puede estar hecha de latón, Monel o níquel puro.

Los bimetálicos pueden funcionar como interruptores, igual que como termostatos: si aumenta mucho la corriente que pasa a través de la tira, el calentamiento hará que el bimetálico se flexione y abra el circuito.

## 16-10 Estructuras tipo emparedado o sandwich

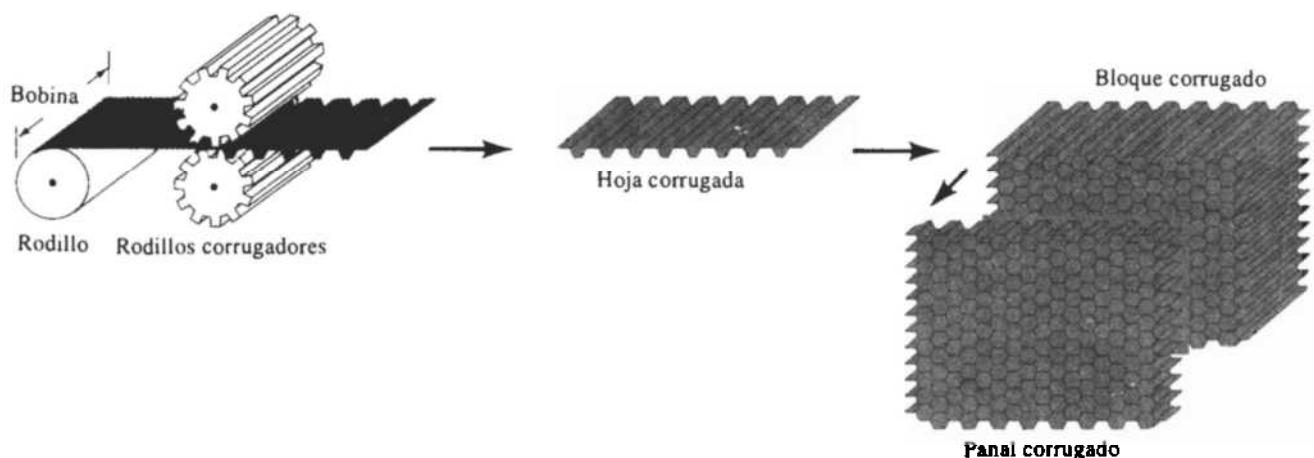
Los materiales en **emparedado** tienen capas delgadas de material de recubrimiento unidas a algún material ligero de relleno, como una espuma de polímero. Ni el relleno ni el material de recubrimiento son resistentes o rígidos, pero el compuesto tiene ambas propiedades. Un ejemplo familiar es el cartón corrugado. Un núcleo corrugado de papel se une por ambos lados a papel plano y grueso. Ni el núcleo corrugado ni el papel de recubrimiento es rígido, pero su combinación lo es.

Otro ejemplo importante es la estructura en panal que se utiliza en aplicaciones para aeronaves. Se produce un **panal** al unir una tira delgada de aluminio en puntos específicos. A continuación el material para el panal se expande para producir un panel celular de muy baja densidad, que por sí mismo es inestable (figura 16-37). Sin embargo, cuando a ambos lados del panal se le adhieren hojas de aluminio, se obtiene un emparedado muy rígido, fuerte y excepcionalmente ligero, con una densidad tan baja como  $0.04 \text{ g/cm}^3$ .



**FIGURA 16-37** Un núcleo en forma de panal constituido por celdas hexagonales (a) que se pueden unir a dos hojas mediante capas adhesivas produciendo (b) una estructura excepcionalmente ligera, rígida y resistente (c).

Las celdas del panal pueden tener una diversidad de formas, hexagonales, cuadradas, rectangulares o senoidales, y se pueden fabricar de aluminio, fibra de vidrio, papel, polímeros de aramida y otros materiales. Las celdas del panal pueden estar llenas de espuma o fibra de vidrio, para proporcionar una excelente absorción de sonidos y vibraciones. La figura 16-38 describe un método mediante el cual se puede fabricar el panal.



**FIGURA 16-38** Método corrugado para la manufactura de un núcleo en forma de panal, un rollo de material (como el aluminio) se corruga entre rodillos. Las hojas corrugadas se unen entre si con adhesivo y a continuación se cortan al espesor deseado.

## RESUMEN

Los compuestos están formados por dos o más materiales, unidos para dar una combinación de propiedades que no se pueden obtener en ninguno de los materiales originales. Casi es posible lograr cualquier combinación de metales, polímeros y materiales cerámicos. En muchos casos, se puede utilizar la regla de las mezclas para estimar las propiedades del compuesto.

- Los materiales endurecidos por dispersión, que no son verdaderos compuestos, contienen partículas de óxido excepcionalmente pequeñas en una matriz de metal. Los pequeños dispersoides estables interfieren con el deslizamiento, dando buenas propiedades mecánicas a temperaturas elevadas.
- Los verdaderos compuestos particulados contienen partículas que dan combinaciones de propiedades al compuesto. Los compuestos de matriz metálica contienen partículas cerámicas o metálicas, que proporcionan dureza, mejor resistencia al desgaste, aseguran buena conductividad eléctrica, buena tenacidad o buena resistencia a la corrosión. Los compuestos de matriz polimérica contienen partículas que mejoran la rigidez, la resistencia al calor, la conductividad eléctrica y, al mismo tiempo, mantienen bajo peso, facilidad de fabricación o un bajo costo.
- Los compuestos reforzados con fibras proporcionan mejoría en la resistencia, rigidez o rendimiento a altas temperaturas en metales y polímeros, dándole tenacidad a los materiales cerámicos:
  - Las fibras típicamente tienen bajas densidades, dando una resistencia y un módulo específico altos, pero a menudo son muy frágiles.
  - Las fibras pueden ser continuas o discontinuas. Las discontinuas que tienen una relación forma alta ( $V/d$ ) producen un mejor refuerzo.
  - Las fibras se introducen en la matriz con una diversidad de orientaciones. Se obtienen orientaciones aleatorias y un comportamiento isotrópico utilizando fibras discontinuas; las fibras alineadas en una sola dirección producen compuestos de comportamiento anisotrópico, con grandes mejorías en resistencia y rigidez paralelas a la dirección de la fibra. Las propiedades se pueden diseñar e integrar para cumplir con las cargas impuestas, mediante la orientación de las fibras en varias direcciones.

- Los compuestos laminares están formados por capas de materiales distintos. Estas capas pueden ser de hojas de metales distintos con uno de ellos aportando la resistencia y otro la dureza o la resistencia a la corrosión. Las capas también pueden incluir hojas de materiales reforzados con fibras unidas a hojas de metal o de polímero o incluso hojas reforzadas con fibras orientadas hacia distintas direcciones. Los compuestos laminares son siempre anisotrópicos.

Los materiales tipo emparedado, incluyendo los panales, son compuestos laminares excepcionalmente ligeros, con caras sólidas unidas a un núcleo prácticamente hueco.

## GLOSARIO

**Bimetálico** Material laminar compuesto, producido al unir dos tiras de metal con distintos coeficientes de expansión térmica, haciendo el material sensible a los cambios de temperatura.

**Carbonización** Expulsión de los átomos distintos al carbono de una fibra polimérica, dejando una fibra de carbono de alta resistencia. Este proceso también es conocido como pirolización.

**Carburos cementados** Compuestos particulados que contienen partículas cerámicas duras, unidas a una matriz metálica blanda. El compuesto combina alta dureza y capacidad de corte, manteniendo de todas formas una buena resistencia al impacto.

**Cintas** Tiras de preformas cuyo espesor es de un solo filamento; los filamentos pueden ser fibras unidireccionales o bien tejidas. Se pueden unir varias capas de cintas para producir estructuras compuestas.

**Compocolado** Inyección a presión de una mezcla tixotrópica de una aleación y de un material de relleno en un dado para formar un compuesto.

**Delaminación** Separación de las capas individuales de un compuesto reforzado con fibras.

**Depósito químico de vapor** Método de manufactura de materiales, consistente en condensar el material en estado de vapor en un sustrato sólido.

**Dispersoides** Pequeñas partículas de óxido formadas en una matriz metálica, que interfieren con los movimientos de dislocación proporcionando endurecimiento, incluso a temperaturas elevadas.

**Emparedado** Material compuesto, construido de un material ligero y de baja densidad, rodeado por capas densas y sólidas. El emparedado combina un peso ligero general con excelente rigidez.

**Enrollado de filamentos** Proceso para producir compuestos reforzados con fibras, en el cual las fibras continuas se enrollan alrededor de un molde o mandril. Las fibras pueden estar preimpregnadas o bien cuando han sido enrolladas pueden impregnarse, para completar la producción del compuesto.

**Extrusión-estirado** Método para la producción de compuestos que contienen esteras o fibras continuas.

**Fibras de aramidas** Clase de fibras poliméricas, como el Kevlar, formada a partir de poliamidas, que contienen el anillo de benceno en la estructura del polímero.

**Hebras** Fibras cortadas en pequeños trozos.

**Hilados** Paquetes de menos de 10,000 filamentos.

**Hilos** Fibras continuas, producidas a partir de un grupo de filamentos retorcidos.

**Mecha** Paquete con más de 10,000 filamentos.

**Módulo específico** Resultado de la división del módulo de elasticidad entre la densidad.

**Panal** Conjunto ligero, pero rígido, formado con una tira de aluminio unida y expandida para formar el núcleo de una estructura tipo emparedado.

**Precursor** Fibra polimérica que se carboniza para producir las fibras de carbono.

**Preformas** Capas de fibras de resinas sin polimerizar. Después de apilar las preformas para conformar la estructura deseada, su polimerización une las capas entre sí.

**Recubierta** Recubrimiento de las fibras de vidrio con un material orgánico que mejora la unión y la resistencia a la humedad dentro del material compuesto.

**Regla de las mezclas** Enunciado que dice que las propiedades de un material compuesto son función de la fracción en volumen de cada material dentro del mismo.

**Relación de forma** Longitud de una fibra dividida entre su diámetro.

**Resistencia específica** Resultado de la división de la resistencia de un material entre su densidad.

**Revestimiento metálico** Capa externa con buena resistencia a la corrosión o alta dureza de un compuesto laminar para cubrir el objetivo de bajo costo o de más alta resistencia.

**Soldadura capilar** Proceso en el cual se introduce un metal líquido de aporte mediante acción capilar entre dos materiales base sólidos, que deben ser unidos. Al solidificarse la aleación de aporte, se obtiene la unión.

**Tixotrópico** Capacidad de un material parte líquido y parte sólido, para conservar su forma hasta que se le aplica un esfuerzo, que lo hace fluir como líquido.

**Whiskers** Fibras muy delgadas que crecen de tal forma que producen cristales individuales sin dislocaciones móviles, dando por lo tanto, resistencias cercanas a las teóricas.

## PROBLEMAS

**16-1** Se produce níquel en un contenido de 2% de torio en forma de polvo. Se consolida en una pieza y se sinteriza en presencia de oxígeno, haciendo que todo el torio produzca esferas de  $\text{ThO}_2$  de 80 nm de diámetro. Calcule el número de esferas por  $\text{cm}^3$ . La densidad del  $\text{ThO}_2$  es de 9.86 g/ $\text{cm}^3$ .

**16-2** El polvo esférico de aluminio de 0.002 mm de diámetro es tratado para crear una capa delgada de óxido y a continuación se utiliza para producir un material endurecido por dispersión SAP con un 10% en volumen de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Calcule el espesor promedio de la película de óxido antes de la compactación y el sinterizado de los polvos para formar la pieza.

**16-3** Se introducen partículas de itria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) de 750 Å de diámetro en el tungsteno mediante oxidación interna. Mediciones con microscopio electrónico muestran que existen  $5 \times 10^{14}$  partículas de óxido por  $\text{cm}^3$ . Calcule el porcentaje en peso de Y originalmente en la aleación. La densidad del  $\text{Y}_2\text{O}_3$  es de 5.01 g/ $\text{cm}^3$ .

**16-4** Sin ningún tratamiento especial, se determina que el aluminio típicamente tiene una capa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 3 nm de espesor. Si polvo esférico de aluminio, preparado con un diámetro total de 0.01 mm, se utiliza para producir un material endurecido por dispersión calcule el porcentaje de volumen de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en el material y el número de partículas

de óxido por  $\text{cm}^3$ . Suponga que el óxido se rompe en partículas en forma de disco de 3 nm de espesor y de  $3 \times 10^{-4}$  mm de diámetro. Compare el número de partículas de óxido por  $\text{cm}^3$  con el número de átomos en solución sólida por  $\text{cm}^3$  cuando se agrega 3% atómico de un elemento de aleación al aluminio.

**16-5** Calcule la densidad del carburo cementado, o cermet, de matriz de titanio, si el compuesto contiene 50% en peso de WC, 22% en peso de TaC y 14% en peso de TiC. (Vea el ejemplo 16-2 para las densidades de los carburos.)

**16-6** Una típica rueda para trituración tiene 9 plg de diámetro, 1 plg de espesor y pesa 6 lb. La rueda contiene SiC (con densidad de 3.2 g/ $\text{cm}^3$ ) unido mediante vidrio de silice (densidad 2.5 g/ $\text{cm}^3$ ); 5% del volumen de la rueda es porosidad. El SiC está en forma de cubos de 0.04 cm. Calcule:

(a) la fracción en volumen de las partículas SiC en la rueda, y

(b) el número de partículas de SiC de la rueda perdidas, una vez que se haya utilizado hasta dejarla de un diámetro de 8 plg.

**16-7** Un material de contacto eléctrico se produce al infiltrar cobre en un material compacto de carburo de tungsteno poroso (WC). La densidad del compuesto final

es  $12.3 \text{ g/cm}^3$ . Suponiendo que se llenan todos los poros con cobre, calcule

- la fracción en volumen del cobre dentro del compuesto,
- la fracción en volumen de poros en el compacto WC antes de la infiltración, y
- la densidad original del compacto WC antes de la infiltración.

**16-8** Un material para contactos eléctricos se produce al hacer primero un material compacto de tungsteno poroso que pesa 125 g. En el compacto se introduce plata líquida; una medición cuidadosa indica que se han infiltrado 105 g de plata. La densidad final del material compuesto es  $13.8 \text{ g/cm}^3$ . Calcule la fracción en volumen del compacto original que corresponde a la porosidad interconectada y a la fracción volumétrica que corresponde a la porosidad cerrada (sin infiltración de plata).

**16-9** ¿Cuánta arcilla debe agregarse a 10 kg de polietileno para producir un material compuesto de bajo costo, con un módulo de elasticidad superior a 120,000 psi, y una resistencia a la tensión por encima de 2000 psi? La densidad de la arcilla es  $2.4 \text{ g/cm}^3$  y la del polietileno es  $0.92 \text{ g/cm}^3$ .

**16-10** Se desea producir una pieza epóxica ligera para aislamiento térmico. Hay esferas huecas de vidrio disponibles cuyo diámetro exterior es  $1/16$  de plg y con un espesor de pared de 0.001 plg. Determine el peso y el número de esferas que deben agregarse al componente epóxico para producir una libra de compuesto, con una densidad de  $0.65 \text{ g/cm}^3$ . La densidad del vidrio es  $2.5 \text{ g/cm}^3$  y la del material epóxico es  $1.25 \text{ g/cm}^3$ .

**16-11** Se introducen 5 kg de fibras continuas de boro en orientación unidireccional, en 8 kg de una matriz de aluminio. Calcule

- la densidad del compuesto
- el módulo de elasticidad paralelo a las fibras y
- el módulo de elasticidad perpendicular a las fibras.

**16-12** Se desea producir 10 lb de un compuesto reforzado con fibras unidireccionales continuas de carbono HS en una matriz poliimida, que tenga un módulo de elasticidad de por lo menos  $25 \times 10^6 \text{ psi}$  paralelo a las fibras. ¿Cuántas libras de fibra se requieren? Vea el capítulo 15 para las propiedades de la poliimida.

**16-13** Se produce un compuesto continuo reforzado unidireccionalmente que contiene 60% en volumen de fibras de carbono HM en una matriz epóxica. El material epóxico tiene una resistencia a la tensión de 15,000 psi. ¿Qué fracción de la fuerza aplicada es soportada por las fibras?

**16-14** Una matriz de poliéster con una resistencia a la tensión de 13,000 psi está reforzada con fibras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . ¿Qué porcentaje en volumen de fibras deberá agregarse para asegurarse de que las fibras soporten el 75% de la carga aplicada?

**16-15** Una matriz epólica está reforzada con 40% en volumen de fibras de vidrio E para producir un compuesto de 2 cm de diámetro, que debe soportar una carga de 25,000 N. Calcule el esfuerzo que actúa sobre cada una de las fibras.

**16-16** Una aleación de titanio, con un módulo de elasticidad de  $16 \times 10^6 \text{ psi}$ , es utilizada para fabricar una pieza de 1000 lb para un vehículo espacial tripulado. Determine el peso de la pieza con el mismo módulo de elasticidad paralelo a las fibras, si la pieza está fabricada de

- aluminio reforzado con fibras de boro, y
- poliéster (con un módulo de 650,000 psi) reforzado con fibras de carbono de alto módulo.
- Compare el módulo específico para cada uno de los tres materiales.

**16-17** Se introducen fibras de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , cortas, pero alineadas, con un diámetro de  $20 \mu\text{m}$ , en una matriz de nylon 6,6. La resistencia de la unión entre fibras y matriz se estima en 1000 psi. Calcule la longitud crítica de las fibras y compárela con una situación en la cual se utilicen whiskers de aluminio de  $1 \mu\text{m}$  en vez de estas fibras. ¿Cuál es la relación de forma másnima en cada uno de los casos?

**16-18** Se preparan varios compuestos de matriz epólica utilizando distintas longitudes de fibras de  $\text{ZrO}_2$  de  $3 \mu\text{m}$  de diámetro y se encontró que la resistencia del compuesto se incrementa al aumentar la longitud de las fibras hasta 5 mm. Para fibras más largas, la resistencia casi no se modifica. Estime la resistencia de la unión entre fibras y matriz.

**16-19** Al producirse un compuesto de matriz polimérica, se introducen fibras de vidrio discontinuas directamente dentro de la matriz; en un segundo caso, las fibras primero se "recubren". Analice el efecto que esta diferencia pudiera tener en la longitud crítica de fibra y en la resistencia del compuesto.

**16-20** Un compuesto de aluminio reforzado con fibras de Borsic aparece en la figura 16-19. Estime las fracciones en volumen de tungsteno, boro y de matriz para este compuesto. Calcule el módulo de elasticidad paralelo a las fibras para este compuesto. ¿Cuál sería el módulo, si se pudiera producir una fibra de boro de ese mismo tamaño, sin precursor de tungsteno?

**16-21** En la figura 16-19 aparece una matriz de nitruro de silicio, reforzado con fibras de carburo de silicio con un precursor de carbono HS. Estime las fracciones en volumen del  $\text{SiC}$ , del  $\text{Si}_3\text{N}_4$  y del carbono para este compuesto. Calcule el módulo de elasticidad paralelo a las fibras para el compuesto. ¿Cuál sería el módulo, si se pudiera producir una fibra de  $\text{SiC}$  del mismo tamaño, sin precursor de carbono?

**16-22** Explique la razón por la cual la unión entre fibras de carbono y matriz epólica deberá resultar excelente, en tanto que la unión entre fibras de nitruro de silicio y la matriz de carburo de silicio debe resultar mala.

**16-23** Una matriz de poliimida debe ser reforzada con 70% en volumen de fibras de carbono para dar un módulo de elasticidad mínimo de  $40 \times 10^6$  psi. Recomiende un proceso para producir las fibras de carbono requeridas. Estime la resistencia a la tensión de las fibras producidas.

**16-24** Se produce un capacitor eléctrico formado por un emparedado de 19 capas de teflón de 0.02 mm de espesor, entre 20 placas de plata de 0.08 mm de espesor. Determine la conductividad eléctrica del capacitor

- (a) paralela a las hojas y
- (b) perpendicular a las hojas.

La conductividad eléctrica de la plata es de  $6.8 \times 10^5$  ohm $^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  y la del teflón es de  $10^{-16}$  ohm $^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

**16-25** Un microlaminado, el Arall, se produce utilizando 5 hojas de aluminio de 0.4 mm de espesor y 4 hojas de material epóxico de 0.2 mm de espesor, reforzado con fibras de Kevlar alineadas unidireccionalmente. La fracción en volumen de las fibras de Kevlar en estas hojas intermedias es de 55%. Calcule el módulo de elasticidad del microlaminado, paralelo y perpendicular a las fibras de Kevlar alineadas de manera unidireccional. ¿Cuáles son las ventajas principales del material Arall en comparación con las del aluminio sin reforzar?

**16-26** Un laminado, compuesto de un aluminio de 0.1 mm de espesor colocado en emparedado alrededor de una capa de 2 cm de espesor de espuma de poliestireno (*Styrofoam*), se produce como material aislante. Calcule la conductividad térmica del laminado paralela y perpendicular a las capas. La conductividad térmica del aluminio es 0.57 cal/cm · s · K y la de la espuma es de 0.000077 cal/cm · s · K.

**16-27** Una hoja de polímero de 0.01 cm de espesor, con un módulo de elasticidad de  $0.7 \times 10^6$  psi, es colocada en emparedado entre dos hojas de vidrio de 4 mm de espesor, con un módulo de elasticidad de  $12 \times 10^6$  psi. Calcule el módulo de elasticidad del compuesto paralela y perpendicularmente a las hojas.

**16-28** Una moneda norteamericana de 25 centavos tiene un diámetro de 15/16 plg y aproximadamente un espesor de 1/16 plg. El cobre cuesta aproximadamente \$1.10/lb y el níquel aproximadamente \$4.10/lb. Calcule el costo del material en una moneda de 25 centavos fabricada de compuesto en comparación con una moneda igual fabricada totalmente de níquel.

**16-29** Calcule la densidad de una estructura en panal compuesta por los siguientes elementos: se producen las dos

hojas de cubierta de 2 mm de espesor utilizando una preforma de matriz epóxica con un 55% en volumen de fibras de vidrio E. El panal de aluminio tiene un espesor de 2 cm. Las celdas son cuadros de 0.5 cm y las paredes de las celdas tienen un espesor de 0.1 mm. Estime la densidad de la estructura. Compare el peso de un tramo de panal de 1 × 2 m, en comparación con un tramo de aluminio sólido con las mismas dimensiones.

## A

### Problemas de diseño

**16-30** Diseñe el material para el ala de un aeroplano, que tenga una conductividad eléctrica de por lo menos  $2 \times 10^3$  ohm $^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$  (vea la tabla 18-1 para valores típicos de metales y polímeros), un módulo de elasticidad de por lo menos  $12 \times 10^6$  psi y una resistencia a la corrosión razonable.

**16-31** Considere una aleación de cobre con 15% en peso de Sn [figura 13-10(b)]. Diseñe un proceso de compoculado que permita la introducción de 40% en volumen de SiC. La densidad de la aleación es de 8.5 g/cm $^3$  y la del SiC es de 3.0 g/cm $^3$ .

**16-32** Diseñe los materiales y el proceso que se requiere para producir un compuesto de fibra de vidrio reforzado por fibras discontinuas, pero alineadas, que formarán el cofre de un automóvil deportivo. El compuesto deberá tener una densidad de menos de 1.6 g/cm $^3$  y una resistencia de 20,000 psi. Asegúrese de enlistar todas las hipótesis que se efectúen en la creación de su diseño.

**16-33** Para almacenar Cl líquido se debe diseñar un tanque esférico de 3 pies de diámetro interior. El depósito debe tener un módulo de elasticidad en dirección tangencial de por lo menos  $15 \times 10^6$  psi, con una conductividad térmica en dirección radial de no más de 0.006 cal/cm · s · K y deberá pesar no más de 170 lb. Utilizando sólo los materiales de la tabla 21-3, diseñe un material y un espesor del depósito que resulte adecuado. Estime el costo de los materiales del tanque, para que no resulte prohibitivamente oneroso.

**16-34** Diseñe un material para contactos eléctricos y un método para su producción, que dé como resultado una densidad no mayor de 6 g/cm $^3$ , y que por lo menos el 50% en volumen del material sea conductor.