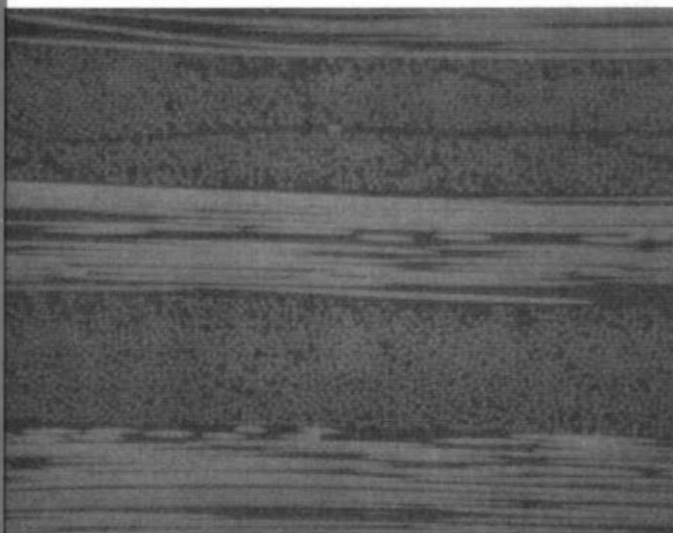
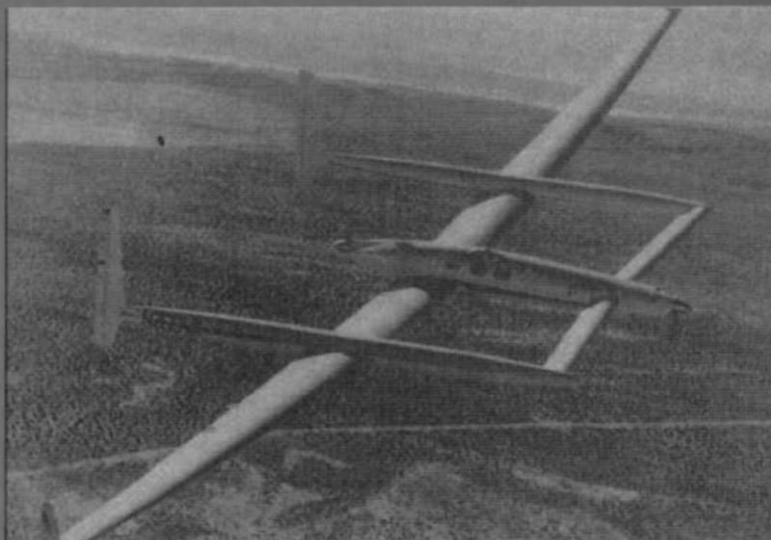


## MATERIALES COMPUESTOS



Arriba: El avión Voyager, que realizó un vuelo sin parar ni repostar de 25 000 millas alrededor del mundo. La estructura del Voyager está fabricada con componentes de alta resistencia y baja densidad, a base de una serie de capas cruzadas consistentes en fibras de grafito embebidas en una matriz epoxi. (Fotografía cortesía de Hercules Inc.) Abajo: Fotomicrografía mostrando una sección de estas capas cruzadas. En las partes superior, central e inferior se aprecian las fibras alineadas paralelamente al plano del papel. En las otras dos capas, las fibras aparecen perpendiculares al plano de la página y se distingue claramente su sección circular.  $\times 100$ . (Fotografía cortesía de S. Y. Gweon y W. D. Bascon.)

## 17.1 INTRODUCCIÓN

La mayoría de las tecnologías modernas requiere materiales con una combinación inusual de propiedades, imposible de conseguir con los metales, las cerámicas y los polímeros convencionales. Esta necesidad es muy evidente en aplicaciones espaciales, subacuáticas y en los transportes. Por ejemplo, los ingenieros aeronáuticos solicitan, cada vez más, materiales de baja densidad que sean resistentes y rígidos, y también resistentes al impacto, a la abrasión y a la corrosión. Esta es una combinación de características bastante extraordinaria. Frecuentemente, los materiales más resistentes son relativamente densos; además, un incremento de la resistencia y de la rigidez se traduce generalmente en una disminución de la resistencia al impacto.

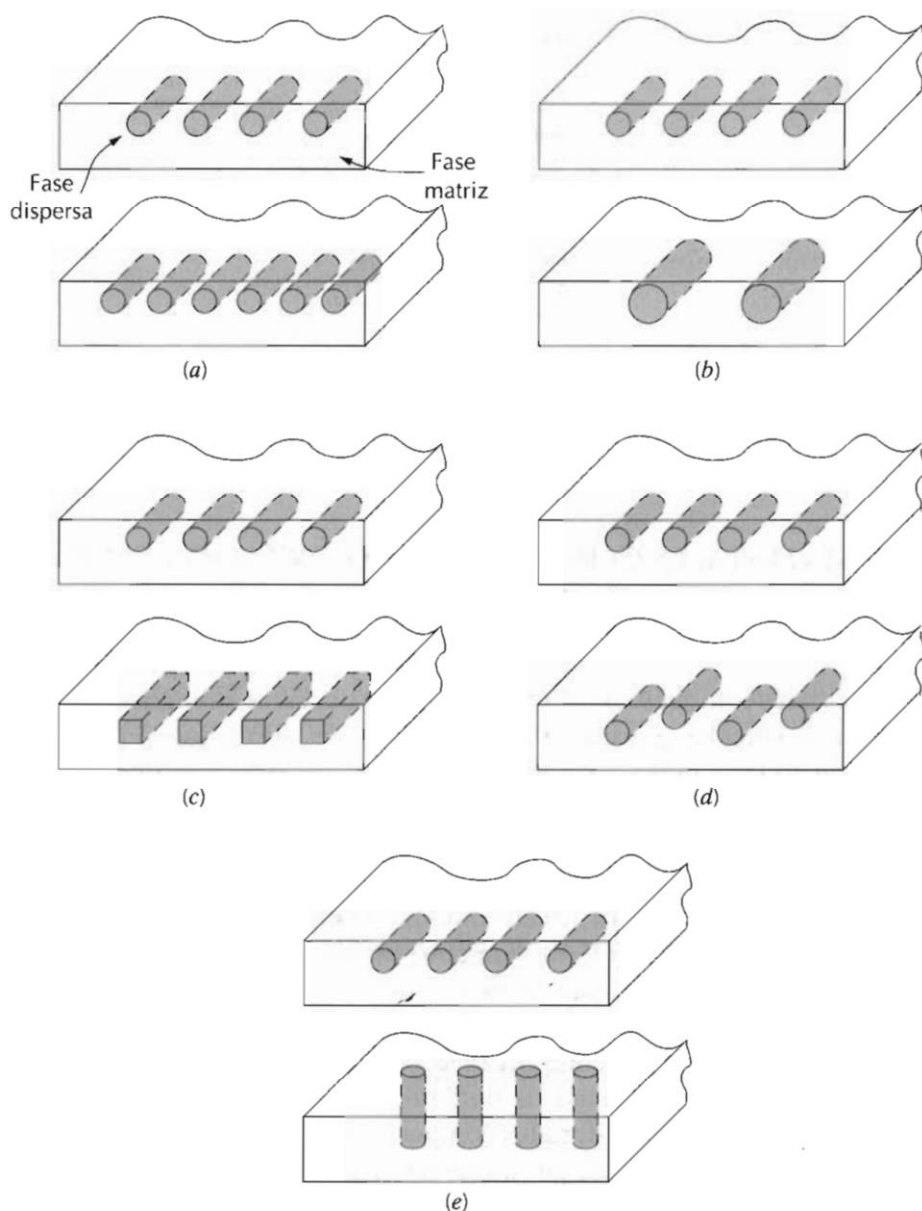
Las combinaciones de propiedades de los materiales y la gama de sus valores se han ampliado, y se siguen ampliando, mediante el desarrollo de materiales compuestos (*composites*). En términos generales, se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes de manera que presente la mejor combinación posible. De acuerdo con este **principio de acción combinada**, las mejores propiedades se obtienen por la combinación razonada de dos o más materiales diferentes. Muchos materiales compuestos tienen propiedades excepcionales.

En este texto ya se han visto algunos tipos de materiales compuestos; entre ellos las aleaciones metálicas, las cerámicas y los polímeros multifásicos. Por ejemplo, los aceros perlíticos (Sección 9.14) tienen una microestructura que consiste en capas alternas de ferrita  $\alpha$  y cementita (Figura 9.23). La fase ferrítica es blanda y dúctil, mientras que la cementita es dura y muy frágil. Las características mecánicas combinadas de la perlita (ductilidad y resistencia razonablemente altas) son superiores a las de cada una de las fases constituyentes. Existen materiales compuestos naturales, como por ejemplo la madera, que consiste en fibras de celulosa flexibles embebidas en un material rígido llamado lignina. El hueso es un material compuesto formado por colágeno, una proteína resistente pero blanda, y por apatito, un mineral frágil.

En el presente contexto, un material compuesto es un material multifase obtenido artificialmente, en oposición a los que se encuentran en la naturaleza. Además, las fases constituyentes deben ser químicamente distintas y separadas por una interfase. Por este motivo, la mayoría de las aleaciones metálicas y muchas cerámicas no encajan en esta definición, ya que sus múltiples fases se forman como consecuencia de fenómenos naturales.

Científicos e ingenieros a la hora de diseñar materiales compuestos han combinado ciertos metales, cerámicas y polímeros para producir una nueva generación de materiales extraordinarios. La mayoría de los materiales compuestos se han creado para mejorar la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a la tracción a temperatura ambiente y a elevadas temperaturas.

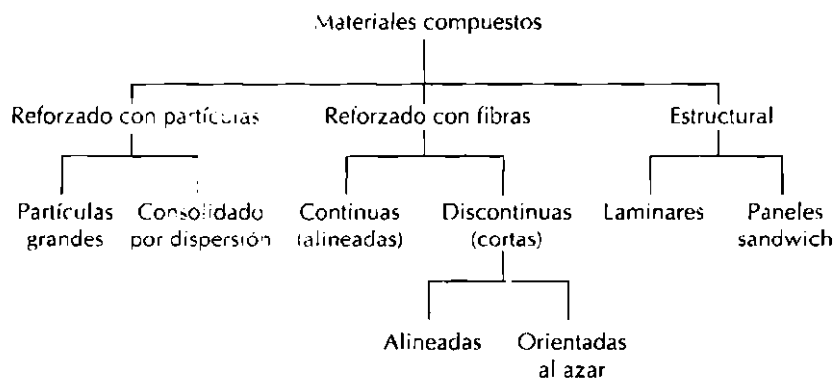
La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos fases; una, llamada **matriz**, es continua y rodea a la otra fase, denominada **fase dispersa**. Las propiedades de los compuestos son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas. "Geometría de la fase dispersa" significa, en este con-



**Figura 17.1** Representaciones esquemáticas de varias características geométricas y espaciales de partículas de fase dispersa que repercuten en las propiedades de los materiales compuestos: (a) concentración, (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución y (e) orientación. (De Richard A. Flinn y Paul K. Trojan, *Engineering Materials and Their Applications*, 3ª edición. Copyright 1986 por Houghton Mifflin Company. Reproducida con autorización.)

texto, la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas; estas características están representadas en la Figura 17.1.

La Figura 17.2 muestra un esquema simple para clasificar los materiales compuestos que, en esencia, consta de tres divisiones: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos estructurales; además, existen dos subdivisiones para cada una. Las partículas de la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con partículas son equiaxiales (es decir, las dimensiones de las partículas son aproximadamente iguales en todas las direcciones); la fase dispersa de los materiales compuestos reforzados con fibras tiene la geometría de una fibra (es decir, una relación longitud-diámetro muy alta). Los materiales compuestos estructurales son materiales compuestos combinados con materiales homogéneos. El resto de los temas de este capítulo se tratará según el esquema de clasificación.



**Figura 17.2** Clasificación de los materiales compuestos tratados en este capítulo.

## MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON PARTÍCULAS

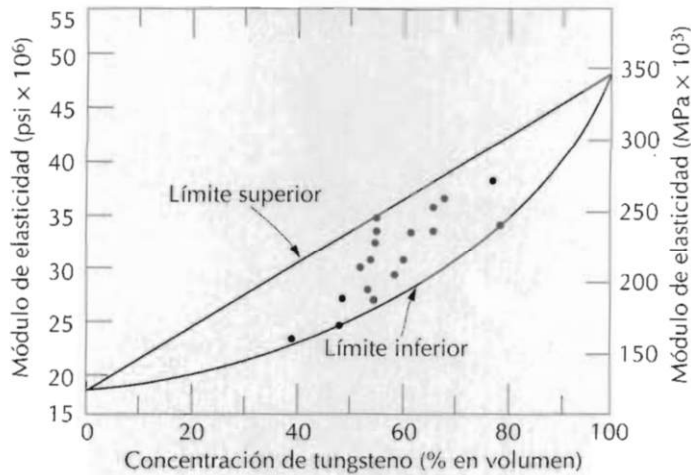
Los materiales compuestos reforzados con partículas se subdividen en **reforzados con partículas grandes** y **consolidados por dispersión** (Figura 17.2). Esta distinción se fundamenta en el mecanismo de consolidación o de reforzamiento. El término "grande" se utiliza para indicar que las interacciones matriz-partícula no se pueden describir a nivel atómico o molecular, sino mediante la mecánica continua. En la mayoría de los materiales compuestos la fase dispersa es más dura y resistente que la matriz y las partículas de refuerzo tienden a restringir el movimiento de la matriz en las proximidades de cada partícula. En esencia, la matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. El grado de reforzamiento o de mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión en la intercara matriz-partícula.

Las partículas de los materiales compuestos consolidados por dispersión normalmente son mucho más pequeñas: los diámetros tienen de 10 a 100 nm. Las interacciones matriz-partícula que conducen a la consolidación ocurren a nivel atómico o molecular. El mecanismo de la consolidación es similar al del endurecimiento por precipitación discutido en la Sección 11.8. Mientras la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada, las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de dislocaciones. De este modo se restringe la deformación plástica de tal manera que aumenta el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza.

### 17.2 MATERIALES COMPUESTOS CON PARTÍCULAS GRANDES

Algunos materiales poliméricos a los que se ha añadido un relleno (Sección 16.11) son realmente materiales compuestos con partículas grandes. En este caso, el material de relleno modifica o mejora las propiedades del material base y/o sustituye una parte del volumen del material polimérico por un material más barato, el relleno.

Un material compuesto con partículas grandes es el hormigón, formado por cemento (matriz) y arena o grava (partículas). El hormigón es el tema de la siguiente discusión.



**Figura 17.3** Módulo de elasticidad en función del porcentaje de volumen de tungsteno en un material compuesto constituido por partículas dispersas de tungsteno en una matriz de cobre. Límites superior e inferior según las Ecuaciones 17.1 y 17.2. Los datos experimentales se han introducido en forma de puntos. (De R. H. Krock, *ASTM Proceedings*, Vol. 63, 1963. Copyright ASTM, 1916 Race Street, Filadelfia, PA 19103. Reproducida con permiso.)

Las partículas pueden tener una gran variedad de geometrías pero suelen presentar aproximadamente la misma dimensión en todas las direcciones (equiaxiales). El reforzamiento es tanto más efectivo cuanto más pequeñas sean las partículas y cuanto mejor distribuidas estén en la matriz. Además, la fracción de volumen de las dos fases influye en el comportamiento; las propiedades mecánicas aumentan al incrementarse el contenido de partículas. Se formulan dos expresiones matemáticas para relacionar el módulo elástico con la fracción de volumen de las fases constituyentes de un material compuesto de dos fases. Las ecuaciones de la **regla de las mezclas** predice que el valor del módulo elástico estará comprendido entre un máximo

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad (17.1)$$

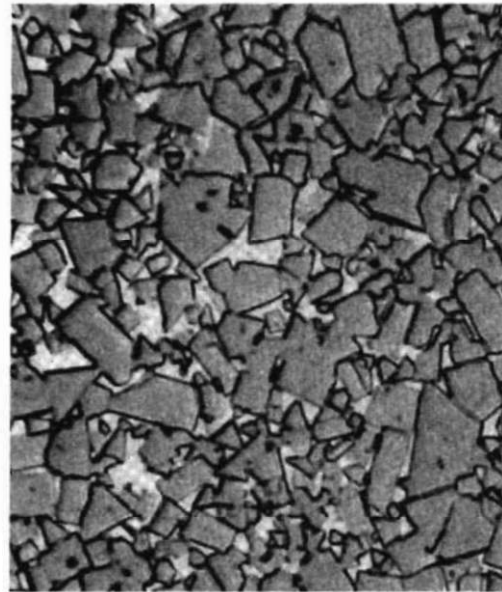
y un mínimo

$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \quad (17.2)$$

En estas expresiones,  $E$  y  $V$  representan el módulo elástico y la fracción de volumen, respectivamente, mientras los subíndices  $c$ ,  $m$  y  $p$  significan material compuesto, matriz y fase-partícula. En la Figura 17.3 se representan los valores superior e inferior de  $E_c$  frente a  $V_p$  para un material compuesto formado por partículas de tungsteno dispersas en una matriz de cobre; los valores experimentales están comprendidos entre las dos curvas. En la Sección 17.5 se deducen ecuaciones parecidas a las 17.1 y 17.2 para compuestos reforzados con fibra.

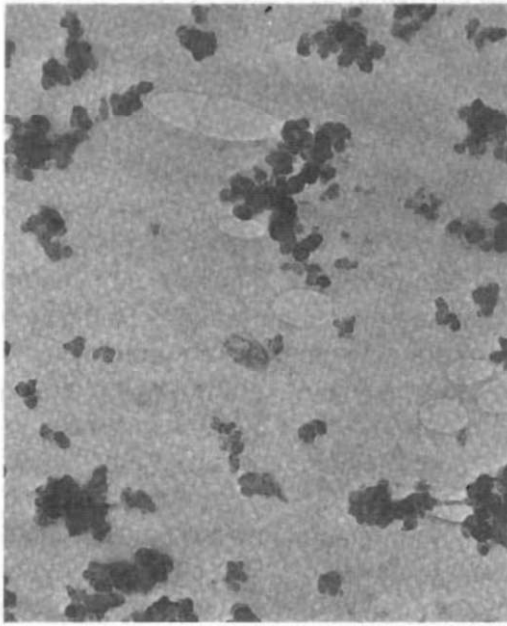
Todos los materiales (metales, polímeros y cerámicas) se utilizan para fabricar materiales compuestos con partículas grandes. Un ejemplo lo constituyen los compuestos metal-cerámica: los **cermets**. El cermet más común es el carburo cementado, que está constituido por partículas extremadamente duras de carburos refractarios cerámicos, como el carburo de tungsteno (WC) o de titanio (TiC), embebidos en una matriz metálica de cobalto o níquel. Estos compuestos encuentran gran aplicación como herramientas de

Figura 17.4 Fotomicrografía de un carburo cementado WC-Co. Las áreas blancas corresponden a la matriz de cobalto; las regiones oscuras son las partículas de carburo de tungsteno.  $\times 100$ . (Cortesía de Carboloy Systems Department, General Electric Company.)



corte para aceros endurecidos. Las duras partículas de carburo aportan el efecto cortante a la superficie, pero, al ser extremadamente frágiles, ellas solas no soportarían los extraordinarios esfuerzos de corte. La tenacidad se mejora incluyendo estas partículas en una matriz metálica dúctil, que las aísla y previene la propagación de grietas entre partículas. La matriz y las partículas tienen carácter refractario para resistir las altas temperaturas generadas en la acción del corte de materiales extremadamente duros. Ningún material simple es capaz de reunir la combinación de propiedades de los cermets. La fracción de la fase formada por las partículas puede representar más del 90% en volumen, de este modo se maximiza la acción abrasiva del compuesto. En la Figura 17.4 se reproduce una fotomicrografía de un carburo cementado WC-Co.

Los elastómeros y los plásticos se refuerzan frecuentemente con materiales en forma de partículas. Los usos de los cauchos modernos se verían seriamente restringidos si no estuvieran reforzados con partículas de materiales tales como el negro de humo. El negro de humo consiste en partículas muy pequeñas y esencialmente esféricas de carbono producidas por la combustión incompleta (defecto de aire) de gas natural u otros derivados del petróleo. La adición de este material extremadamente barato al caucho vulcanizado aumenta la tenacidad y las resistencias a la tracción, a la torsión y al desgaste. Los neumáticos para coches contienen del 15 al 30% en volumen de negro de humo. El efecto reforzante del negro de humo se alcanza utilizando partículas de tamaño relativamente pequeño, con diámetros comprendidos entre 20 y 50 nm, y deben estar uniformemente distribuidas en el caucho y formar una unión fuerte con la matriz. Como partículas de refuerzo se utilizan otros materiales (p.ej., sílice) que son menos efectivos porque no se genera la especial interacción partícula-matriz comentada antes. En la Figura 17.5 se muestra una micrografía electrónica de un caucho reforzado con negro de humo.



**Figura 17.5** Micrografía electrónica mostrando partículas de negro de humo esféricas que actúan reforzando el caucho sintético de un neumático. Las áreas que parecen manchas de agua corresponden a pequeñas burbujas de aire dentro del caucho. x 80 000. (Cortesía de Goodyear Tire & Rubber Company.)

### 17.2.1 Hormigón

El **hormigón** es un material compuesto con partículas grandes: las fases matriz y dispersa son cerámicas. Debido a que los términos "hormigón" y "cemento" se suelen utilizar indistintamente conviene comentar la diferencia existente entre ambos. En sentido amplio, el término hormigón se refiere a un material compuesto formado por un agregado de partículas unidas entre sí mediante cemento. Los dos tipos de hormigón más utilizados son los constituidos por partículas de grava y arena unidas mediante cementos portland o asfáltico. El hormigón asfáltico se suele utilizar para pavimentos, mientras que el hormigón portland se emplea extensamente como material para la construcción de edificios. A continuación se trata este último.

**Hormigón de cemento portland.** El cemento portland, un agregado fino (arena), un agregado grueso (grava) y agua son los ingredientes del hormigón de cemento portland. La fabricación y el mecanismo de fraguado del cemento portland se discuten brevemente en la Sección 14.16. Las partículas agregadas actúan como material de relleno para disminuir el precio total del hormigón, ya que son baratas, mientras el cemento es relativamente caro. Los ingredientes se deben añadir en las proporciones correctas para conseguir la óptima resistencia y facilidad de trabajo de un hormigón. El empaquetamiento denso del agregado y el buen contacto de las intercaras se logra con partículas de dos diferentes tamaños; las partículas finas de arena deben acupar los espacios vacíos entre partículas de grava. Estos agregados de partículas suelen ocupar entre el 60 y el 80% del volumen total. La pasta cemento-agua debe cubrir todas las partículas de arena y de grava después de la mezcla. La unión completa entre el cemento y las partículas de agregado depende de la adición de la cantidad correcta de agua. La deficiencia de agua se traduce en una unión incompleta y el exceso favorece la porosidad; en ambos casos la resistencia final es menor que la óptima.

El carácter de las partículas agregadas es de capital importancia. Por un lado, la distribución de tamaños del agregado influye en la cantidad necesaria de pasta cemento-agua; y, por otro, las superficies del agregado deben estar limpias de arcilla y limo, que dificultan la formación de una buena unión en la superficie de las partículas.

El hormigón de cemento portland es el material más utilizado en la construcción, principalmente porque se puede introducir en el encofrado y endurecer a temperatura ambiente, e incluso sumergido en agua. Sin embargo, como material estructural presenta algunos inconvenientes y limitaciones. Como la mayoría de los materiales cerámicos, el hormigón de cemento portland es relativamente poco resistente y extremadamente frágil; su resistencia a la tracción es 10 a 15 veces menor que su resistencia a la compresión. Por otro lado, las grandes estructuras de hormigón pueden experimentar considerables dilataciones y contracciones térmicas con las fluctuaciones de temperatura. Además, el agua penetra a través de los poros externos y puede provocar grietas durante el tiempo frío como consecuencia de los ciclos congelación-descongelación. La mayoría de estos inconvenientes se eliminan mediante reforzamiento (armadura) o mediante la incorporación de aditivos.

**Hormigón armado.** La resistencia del hormigón de cemento portland aumenta mediante el reforzado: introducción de tubos, barras, alambres o malla de acero en el cemento fresco antes de fraguar. La armadura capacita a las estructuras consolidadas para soportar mayores esfuerzos a la tracción, a la compresión y a la cizalladura. Aun cuando se desarrollan grietas en el hormigón, la armadura mantiene un considerable reforzamiento.

El material de refuerzo más utilizado es el acero, ya que su coeficiente de dilatación térmica es parecido al del hormigón. Además, dentro del cemento, el acero es resistente a la corrosión y adquiere una unión cohesiva relativamente fuerte con el hormigón fraguado. La adherencia mejora considerablemente utilizando acero con superficies arrugadas, lo que permite un mayor grado de acoplamiento mecánico.

El hormigón de cemento portland también se puede reforzar mezclando el hormigón fresco con fibras de materiales de alto módulo elástico tales como vidrio, acero, nilón y polietileno. Al utilizar este tipo de refuerzos se debe prestar especial atención a lo que se mezcla, ya que algunos materiales fibrosos se deterioran rápidamente en un ambiente de cemento.

Incluso se aplica reforzamiento mediante técnicas que introducen esfuerzos de compresión residual para aumentar la resistencia del hormigón: así se genera el **hormigón pretensado**. Este procedimiento utiliza una característica de las cerámicas frágiles: normalmente son más resistentes a la compresión que a la tracción. De este modo para romper un miembro de hormigón pretensado se debe aplicar una fuerza a la tracción superior a la magnitud de la fuerza compresiva residual.

En la fabricación de hormigón pretensado se utilizan alambres de acero colocados dentro del molde y sometidos a un elevado esfuerzo de tracción, que permanece constante. Después del fraguado y del endurecimiento del hormigón, se elimina el esfuerzo aplicado. Así, los alambres se contraen y someten la estructura a un estado de compresión porque el esfuerzo se transmite al hormigón mediante las uniones alambre-hormigón recién formadas.

Otro procedimiento de reforzamiento aplica esfuerzos después de fraguar y endurecer el hormigón: es el llamado *postensado*. En el interior y a



través de la cavidad donde más tarde se colocará el hormigón se instalan láminas metálicas o tubos de caucho. Después de que el hormigón ha endurecido, se colocan varillas de acero a través de los tubos y se aplican esfuerzos mediante gatos hidráulicos colocados en la pared de la estructura. De nuevo, un esfuerzo de compresión se impone a la pieza de hormigón, esta vez mediante gatos hidráulicos. Finalmente, los espacios vacíos de los tubos de caucho se llenan con hidróxido cálcico para proteger las varillas de la corrosión.

El hormigón pretensado de alta calidad tiene baja velocidad de agrietamiento y de fluencia. El hormigón pretensado generalmente se utiliza para construir carreteras y puentes.

### 17.3 MATERIALES COMPUESTOS CONSOLIDADOS POR DISPERSIÓN

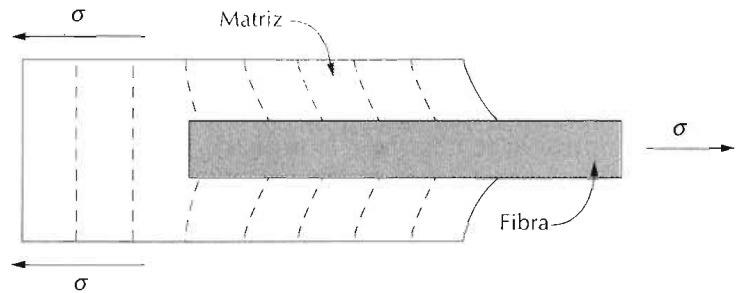
La resistencia y la dureza de los metales y de las aleaciones metálicas pueden aumentarse mediante la dispersión uniforme de finas partículas de material muy duro e inerte en cantidades correspondientes a varios porcentajes en volumen. La fase dispersa puede ser metálica o no metálica; generalmente se utilizan óxidos. Otra vez, el mecanismo del aumento de resistencia transcurre mediante las interacciones entre las partículas y las dislocaciones que circulan por la matriz, mecanismo análogo al de endurecimiento por precipitación. El aumento de resistencia por dispersión no es tan pronunciado como el endurecimiento por precipitación; sin embargo, el incremento de resistencia se mantiene a elevada temperatura durante prolongados períodos de tiempo, porque las partículas dispersas se han escogido por su falta de reactividad con la fase matriz. En las aleaciones endurecidas por precipitación, el incremento de resistencia desaparece por tratamiento térmico como consecuencia del crecimiento del precipitado o de la disolución de la fase precipitada.

La resistencia a elevadas temperaturas de las aleaciones de níquel aumenta significativamente por adición de un 3% en volumen de toria ( $\text{ThO}_2$ ) como partículas finamente dispersadas; este material se conoce como níquel con toria dispersa (o TD). Análogo efecto se produce en el sistema aluminio-óxido de aluminio. En la matriz metálica de aluminio se dispersan escamas extremadamente pequeñas ( $0,1$  a  $0,2 \mu\text{m}$  de espesor) de aluminio recubiertas de una muy delgada y adherente película de alúmina; este material se denomina polvo de aluminio sinterizado (SAP).

### MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

Tecnológicamente, los materiales compuestos con fases dispersas en forma de fibras son los más importantes. A menudo se diseñan **materiales compuestos reforzados con fibras** con la finalidad de conseguir elevada resistencia y rigidez a baja densidad. Estas características se expresan mediante los parámetros **resistencia específica** y **módulo específico**, que corresponden, respectivamente, a las relaciones entre la resistencia a la tracción y el peso específico y entre el módulo de elasticidad y el peso específico. Utilizando materiales de baja densidad, tanto para la matriz como para las fibras, se fabrican compuestos reforzados con fibras que tienen resistencias y módulos específicos excepcionalmente elevados.

**Figura 17.6** Patrón de deformación en una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción.



Los materiales compuestos reforzados con fibras se subclasifican por la longitud de la fibra (Figura 17.2). En el caso de fibras cortas, éstas suelen ser demasiado cortas para conseguir un apreciable aumento de resistencia.

#### 17.4 INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LA FIBRA

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. En este proceso de transmisión de carga es muy importante la magnitud de la unión en la intercara de las fases matriz y fibra. Al aplicar un esfuerzo de tracción, la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación como el que se muestra en la Figura 17.6; en otras palabras, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz.

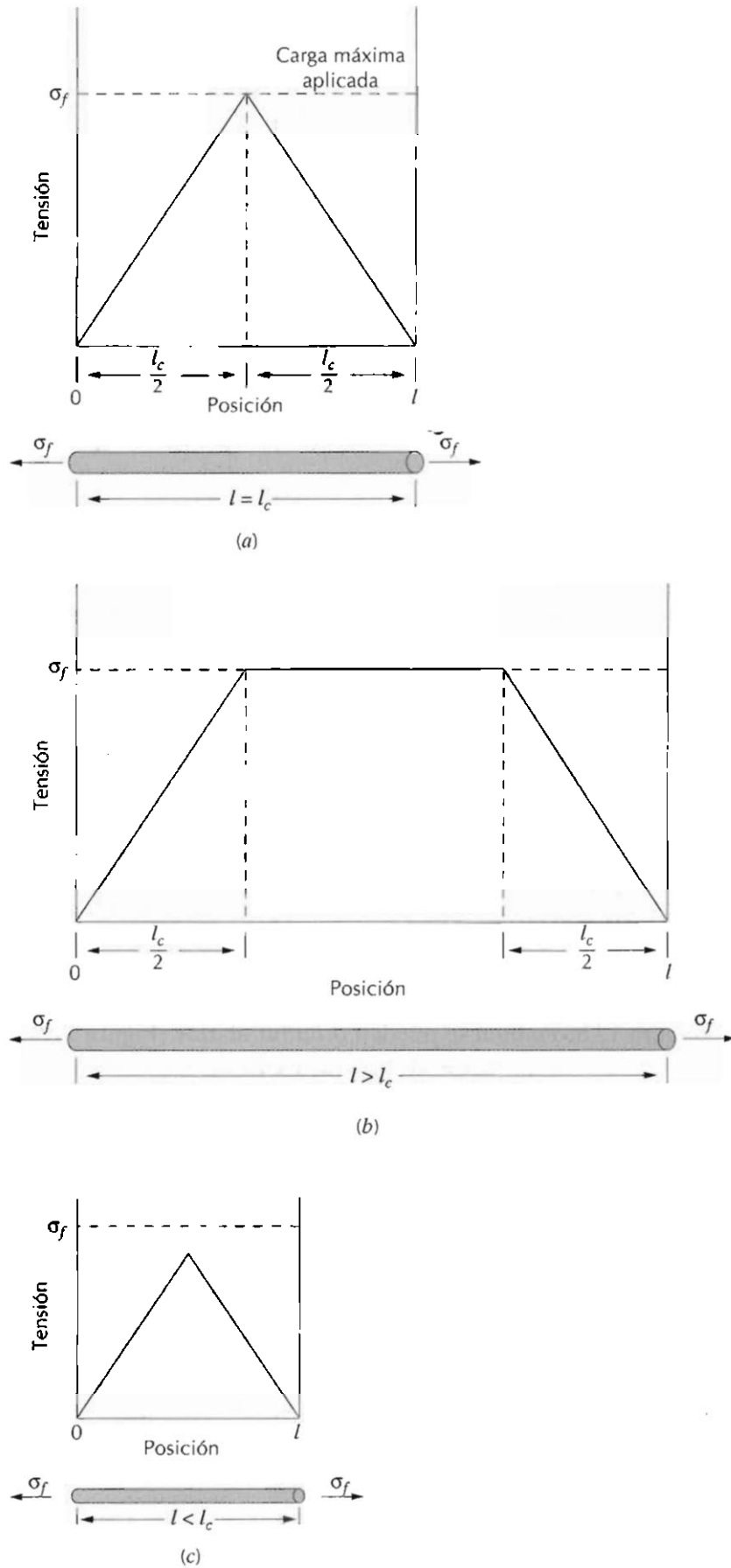
Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta longitud crítica  $l_c$  depende del diámetro  $d$  de la fibra, de la resistencia a la tracción  $\sigma_f$  y de la resistencia de la unión matriz-fibra (o resistencia a la cizalladura de la matriz)  $\tau_c$ , de acuerdo con

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{\tau_c} \quad (17.3)$$

La longitud crítica de algunas combinaciones de matriz-fibra de vidrio y de carbono es del orden de 1 mm, equivalente a unas 20 a 150 veces el diámetro de la fibra.

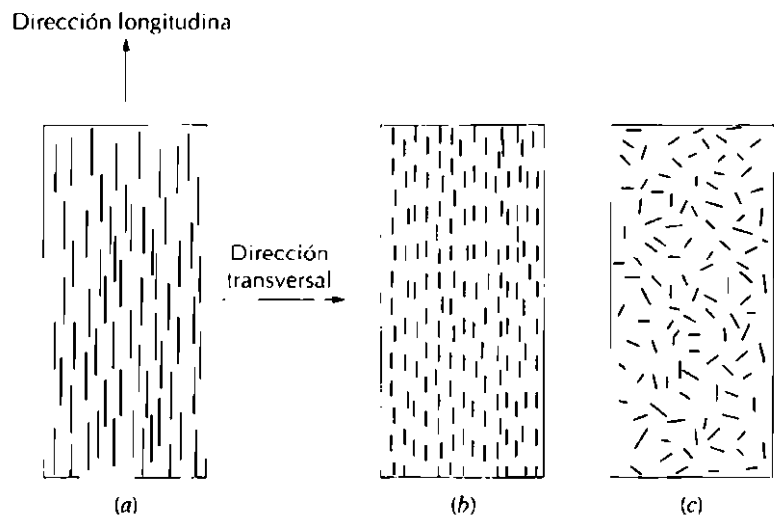
Cuando se aplica un esfuerzo de  $\sigma_f$  a una fibra que tiene una longitud igual al de la crítica, los resultados del perfil del esfuerzo-posición se muestran en la Figura 17.7a; esto es, la carga máxima sólo se consigue en el centro del eje de la fibra. Si la longitud  $l$  de la fibra se incrementa, el reforzamiento de la fibra se hace más efectivo, como indica la Figura 17.7b, donde la posición esfuerzo-posición axial para  $l > l_c$  cuando el esfuerzo aplicado es igual a la resistencia de la fibra. La Figura 17.7c muestra el perfil esfuerzo-posición para  $l < l_c$ .

Las fibras con  $l \gg l_c$  (normalmente  $l > 15 l_c$ ) se denominan *continuas*; y las fibras de menor longitud se denominan *discontinuas* o *fibras cortas*. En las fibras discontinuas de longitud significativamente menor que  $l_c$ , la matriz se deforma alrededor de la fibra de modo que apenas existe transferencia del



**Figura 17.7** Perfiles esfuerzo-posición cuando la longitud de la fibra  $l$  es (a) igual a la longitud crítica  $l_c$ , (b) mayor que la longitud crítica y (c) menor que la longitud crítica en un compuesto reforzado con fibra y sometido a un esfuerzo de tracción igual a la resistencia a la tracción  $\sigma_f$  de la fibra.

**Figura 17.8** Representaciones esquemáticas de compuestos reforzados con fibras (a) continuas y alineadas, (b) discontinuas y alineadas y (c) discontinuas y orientadas al azar.



esfuerzo y el efecto del reforzamiento de la fibra es insignificante. Esencialmente, estos materiales compuestos son similares a los reforzados con partículas vistos anteriormente. Para que el efecto reforzante de las fibras sobre los materiales compuestos sea significativo, las fibras deben ser continuas.

### 17.5 INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN Y DE LA CONCENTRACIÓN DE LA FIBRA

La disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras. Con respecto a la orientación existen dos situaciones extremas: (1) alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras y (2) alineación al azar. Las fibras continuas normalmente se alinean (Figura 17.8a), mientras que las fibras discontinuas se pueden alinear (Figura 17.8b) o bien se pueden orientar al azar (Figura 17.8c) o alinearse parcialmente. Las mejores propiedades de los materiales compuestos se consiguen con la distribución uniforme de la fibra.

#### 17.5.1 Materiales compuestos con fibras continuas y alineadas

**Carga longitudinal.** Las propiedades de un compuesto con fibras alineadas tienen carácter altamente anisotrópico, esto es, depende de la dirección en que se miden. Conviene considerar la deformación de este tipo de compuestos originada por un esfuerzo aplicado a lo largo de la dirección de alineamiento, la **dirección longitudinal** (Figura 17.8a), y suponer que la unión matriz-fibra es muy fuerte, de modo que la deformación de la matriz y de la fibra es la misma (situación de *isodeformación*). En estas condiciones, la carga total soportada por el compuesto  $F_c$  es igual a las cargas soportadas por la fase matriz  $F_m$  y por la fase fibra  $F_f$ :

$$F_c = F_m + F_f \quad (17.4)$$

Teniendo en cuenta la definición de esfuerzo,  $F = \sigma A$ , es posible obtener las expresiones de  $F_c$ ,  $F_m$  y  $F_f$  en función de sus respectivos esfuerzos ( $\sigma_c$ ,  $\sigma_m$  y

$\sigma_i$ ) y de sus respectivas áreas ( $A_c$ ,  $A_m$  y  $A_f$ ). Aplicando estas expresiones en la Ecuación 17.4 resulta:

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (17.5)$$

Dividiendo todos los términos por el área de la sección del compuesto,  $A_c$ :

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \quad (17.6)$$

donde  $A_m/A_c$  y  $A_f/A_c$  son las fracciones de área de la matriz y de la fibra, respectivamente. Si las longitudes del compuesto, de la matriz y de las fibras son iguales,  $A_m/A_c$  es equivalente a la fracción de volumen de la matriz,  $V_m$ , y  $A_f/A_c$  es equivalente a la fracción de volumen de las fibras,  $V_f$ . La Ecuación 17.6 se convierte en:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (17.7)$$

En un estado de isodeformación se cumple

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \quad (17.8)$$

y si cada término de la ecuación 17.7 se divide por su respectiva deformación:

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \quad (17.9)$$

Además, si las deformaciones del compuesto, de la matriz y de la fibra son todas elásticas, se cumple  $\sigma_c/\epsilon_c = E_c$ ,  $\sigma_m/\epsilon_m = E_m$ , y  $\sigma_f/\epsilon_f$ , siendo las  $E$  los módulos de elasticidad de las respectivas fases. Sustituyendo en la Ecuación 17.9, resulta

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad (17.10a)$$

o

$$E_c = E_m(1 - V_f) + E_f V_f \quad (17.10b)$$

ya que el compuesto sólo consta de matriz y de fibras; esto es,  $V_m + V_f = 1$ .

Así, el módulo de elasticidad de un material compuesto reforzado con fibras continuas y alineadas en la *dirección de alineamiento* es igual a las fracciones de volumen multiplicadas por los módulos de elasticidad de ambas fases. Algunas otras propiedades, como la resistencia a la tracción, también dependen de las fracciones de volumen. La Ecuación 17.10a para los compuestos reforzados con fibras es análoga a la Ecuación 17.1, el límite superior para compuestos reforzados con partículas.

También se puede demostrar, para cargas longitudinales, que la relación de la carga soportada por las fibras y la soportada por la matriz es

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (17.11)$$

Esta demostración se propone como problema de final de capítulo.

Un compuesto reforzado con fibra de vidrio continua y alineada consiste en un 40% en volumen de fibra de vidrio con un módulo elástico de  $69 \times 10^3$  MPa y un 60% en volumen de resina de poliéster endurecida y con módulo de  $3,4 \times 10^3$  MPa.

(a) Calcule el módulo de elasticidad de este compuesto en la dirección longitudinal.

(b) Si el área de la sección transversal es  $258 \text{ mm}^2$  y el esfuerzo aplicado en dirección longitudinal es  $48,3 \text{ MPa}$ , calcule las magnitudes de las cargas soportadas por las fibras y por la matriz.

(c) Determine la deformación experimentada por cada fase al aplicar la carga indicada en (b).

(d) Suponiendo que las resistencias a la tracción del vidrio y del poliéster son  $3,5 \times 10^3$  y  $69 \text{ MPa}$ , respectivamente, determine la resistencia a la tracción longitudinal de la fibra del compuesto.

### SOLUCIÓN

(a) El módulo de elasticidad del compuesto se calcula utilizando la Ecuación 17.10a:

$$E_c = (3,4 \times 10^3 \text{ MPa})(0,6) + (69 \times 10^3 \text{ MPa})(0,4) = 3 \times 10^4 \text{ MPa}$$

(b) La relación entre la carga de la fibra y la carga de la matriz se obtiene utilizando la Ecuación 17.11

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{(69 \times 10^3 \text{ MPa})(0,4)}{(3,4 \times 10^3 \text{ MPa})(0,6)} \cong 13,3$$

o  $F_f = 13,3 F_m$

La fuerza total soportada por el compuesto  $F_c$  se calcula a partir del esfuerzo aplicado  $\sigma$  y el área de la sección total  $A_c$  del compuesto.

$$F_c = A_c \sigma = (258 \text{ mm}^2)(48,3 \text{ MPa}) = 12\,400 \text{ N}$$

La carga total es la suma de las cargas soportadas por la matriz y por las fibras.

$$F_c = F_f + F_m = 12\,400 \text{ N}$$

Sustituyendo  $F_f$  por el valor obtenido más arriba,

$$13,3F_m + F_m = 12\,400 \text{ N}$$

o

$$F_m = 870 \text{ N}$$

mientras que

$$F_f = F_c - F_m = 12\,400 \text{ N} - 870 \text{ N} = 11\,530 \text{ N}$$

Es decir, la fibra soporta la mayor parte de la carga aplicada.

(c) En primer lugar se calculan los esfuerzos aplicados a la fibra y a la matriz. En segundo lugar se determinan las deformaciones utilizando los módulos elásticos de (a).

Para calcular los esfuerzos por unidad de superficie, se deben obtener previamente las áreas.

$$A_m = V_m A_c = (0,6)(258 \text{ mm}^2) = 155 \text{ mm}^2$$

y

$$A_f = V_f A_c = (0,4)(258 \text{ mm}^2) = 103 \text{ mm}^2$$

Así,

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_m} = \frac{870 \text{ N}}{155 \text{ mm}^2} = 5,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} = \frac{11\,500 \text{ N}}{103 \text{ mm}^2} = 112,3 \text{ MPa}$$

Finalmente se calculan las deformaciones

$$\epsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{5,6 \text{ MPa}}{3,4 \times 10^3 \text{ MPa}} = 1,63 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{112,3 \text{ MPa}}{69 \times 10^3 \text{ MPa}} = 1,63 \times 10^{-3}$$

Es decir, las deformaciones en la matriz y en la fibra son idénticas, lo que está de acuerdo con la Ecuación 17.8 previamente desarrollada.

(d) Para la resistencia a la tracción (TS) escribimos:

$$(TS)_c = (TS)_m V_m + (TS)_f V_f \quad (17.12)$$

Para el compuesto en la dirección longitudinal:

$$(TS)_c = (69 \text{ MPa})(0,60) + (3,5 \times 10^3 \text{ MPa})(0,40) = 1\,420 \text{ MPa}$$

**Carga transversal.** Un material compuesto con fibras continuas y orientadas se puede cargar en la **dirección transversal**; esto es, la carga se aplica perpendicularmente a la dirección de la fibra alineada, como indica la Figura 17.8a. En esta condición, el compuesto y ambas fases están expuestos al mismo esfuerzo  $\sigma$ .

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad (17.13)$$

Se denomina estado *isotensionado*. La deformación del material compuesto  $\epsilon_c$  es

$$\epsilon_c = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f \quad (17.14)$$

pero ya que  $\epsilon = \sigma/E$

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f \quad (17.15)$$

Dividiendo ambos miembros por el esfuerzo  $\sigma$

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (17.16)$$

que se reduce a

$$E_c = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m} \quad (17.17)$$

La Ecuación 17.17 es análoga a la del límite inferior de compuestos con partículas: Ecuación 17.2.

### PROBLEMA RESUELTO 17.2

Calcule el módulo elástico del material compuesto descrito en el Problema Resuelto 17.1, suponiendo que el esfuerzo se aplica perpendicularmente a la dirección de alineación de la fibra.

#### SOLUCIÓN

De acuerdo con la Ecuación 17.17,

$$E_c = \frac{(3,4 \times 10^3 \text{ MPa})(69 \times 10^3 \text{ MPa})}{(0,6)(69 \times 10^3 \text{ MPa}) + (0,4)(3,4 \times 10^3 \text{ MPa})} = 5,6 \times 10^3 \text{ MPa}$$

Este valor de  $E_c$  es ligeramente superior al de la matriz, pero sólo aproximadamente una quinta parte del módulo elástico a lo largo de la dirección de la fibra (Problema Resuelto 17.1a), lo que indica el grado de anisotropía de compuestos con fibras continuas y orientadas.

### 17.5.2 Materiales compuestos con fibras discontinuas y alineadas

Aunque la eficacia del reforzamiento con fibras discontinuas es inferior a la originada por fibras continuas, los materiales compuestos reforzados con fibras discontinuas y alineadas (Figura 17.8b) tienen una importancia cada vez mayor. Las fibras de vidrio cortadas se utilizan mucho; al igual que las fibras discontinuas de carbono y de aramida. Estos compuestos con fibras cortas alcanzan módulos de elasticidad y resistencia a la tracción de aproximadamente el 90% y el 50%, respectivamente, de los materiales compuestos con fibras continuas.

En los compuestos con fibras discontinuas, alineadas, uniformemente distribuidas y con  $l > l_c$  la resistencia a la tracción  $(TS)_c$  longitudinal cumple la siguiente relación:

$$(TS)_c = (TS)_f V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + (TS)_m' (1 - V_f) \quad (17.18)$$

donde  $(TS)_f$  y  $(TS)_m'$  representan, respectivamente, la resistencia a la fractura de la fibra y la tensión en la matriz cuando el material compuesto se rompe.



**Tabla 17.1** Propiedades del policarbonato sin refuerzo y reforzado con fibra de vidrio orientada al azar.

Propiedades	No reforzado	Reforzado con fibra (% volumen)		
		20	30	40
Gravedad específica	1,19-1,22	1,35	1,43	1,52
Resistencia a la tracción [psi × 10 <sup>3</sup> (MPa)]	8,5-9,0 (59-62)	16 (110)	19 (131)	23 (159)
Módulo de elasticidad [psi × 10 <sup>3</sup> (MPa)]	325-340 (2240-2345)	860 (5930)	1250 (8620)	1680 (11 590)
Elongación (%)	90-115	4-6	3-5	3-5
Resistencia al impacto, Izod con entalla (lib/pulg.)	12-16	2,0	2,0	2,5

Fuente: Adaptado de Materials Engineering's *Materials Selector*. Copyright Penton/IPC.

Si la longitud de la fibra es menor que la crítica ( $l < l_c$ ) el valor de la resistencia longitudinal es:

$$(TS)_c = \frac{l\tau_c}{d} V_f + (TS)_m' (1 - V_f) \quad (17.19)$$

donde  $d$  es el diámetro de la fibra.

### 17.5.3 Materiales compuestos con fibras discontinuas y orientadas al azar

Normalmente, cuando los materiales compuestos tienen fibras orientadas al azar, éstas suelen ser discontinuas y cortas; un reforzamiento de este tipo está representado en la Figura 17.8c. En estas circunstancias, el módulo elástico se expresa mediante una "regla de las mezclas" parecida a la Ecuación 17.10a:

$$E_c = KE_f V_f + E_m V_m \quad (17.20)$$

En esta expresión  $K$  es el parámetro de eficiencia de la fibra, que depende de  $V_f$  y de la relación  $E_f/E_m$ . Desde luego, esta magnitud es inferior a la unidad y ordinariamente del orden de 0,1 a 0,6. El módulo elástico de los materiales reforzados, tanto si las fibras están alineadas como si están orientadas al azar, aumenta al incrementarse la fracción de volumen de la fibra. En la Tabla 17.1 se indican algunas propiedades mecánicas de los policarbonatos no reforzado y reforzado con fibras de vidrio discontinuas y orientadas al azar. Esta tabla da una idea de las magnitudes que se pueden obtener mediante reforzamiento.

Resumiendo: los compuestos con fibras alineadas son anisotrópicos y la máxima resistencia (reforzamiento) se consigue a lo largo de la dirección de alineación (longitudinal). En la dirección transversal, el reforzamiento mediante fibras prácticamente no existe: la rotura suele ocurrir a esfuerzos de tracción relativamente bajos. Los esfuerzos aplicados en otras direcciones encuentran resistencias comprendidas entre estos extremos. En la Tabla 17.2 se indican las eficiencias del reforzamiento con fibras en varias situaciones; la eficiencia se toma arbitrariamente como la unidad en la dirección paralela a la alineación y cero en la dirección perpendicular.

**Tabla 17.2** Eficiencia del reforzamiento de compuestos reforzados con fibra orientada en varias direcciones y esfuerzos aplicados en varias direcciones.

<i>Orientación de la fibra</i>	<i>Dirección del esfuerzo</i>	<i>Eficiencia del reforzamiento</i>
Todas las fibras paralelas	Paralela a las fibras	1
	Perpendicular a las fibras	0
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en un plano específico	Cualquier dirección en el plano de las fibras	3/8
Fibras orientadas al azar y uniformemente distribuidas en el espacio de tres dimensiones	Cualquier dirección	1/5

**Fuente:** H. Krenchel, *Fibre Reinforcement*, Copenague: Akademisk Forlag, 1964 [33].

Si una lámina debe estar sometida a esfuerzos multidireccionales, normalmente se utilizan varias capas yuxtapuestas con fibras alineadas en diferentes direcciones. Son los denominados *materiales compuestos laminares*, discutidos en la Sección 17.13.

En las aplicaciones en las que las fibras están sometidas a esfuerzos totalmente multidireccionales normalmente se utilizan fibras discontinuas orientadas al azar en la matriz. La Tabla 17.2 muestra que la eficiencia del reforzamiento de estos compuestos es sólo la quinta parte de la eficacia correspondiente a los compuestos cuyas fibras están alineadas en la dirección longitudinal; sin embargo, las propiedades mecánicas son isotrópicas.

Las consideraciones sobre la orientación y la longitud de las fibras de un compuesto particular dependen del nivel y de la naturaleza del esfuerzo aplicado y del coste de fabricación. Las velocidades de producción de compuestos con fibras cortas (alineadas y orientadas al azar) son rápidas y se pueden conformar piezas de formas intrincadas que no son posibles con refuerzos de fibras continuas. Además, los costes de fabricación son mucho más bajos que en el caso de compuestos reforzados con fibras continuas y alineadas; las técnicas de conformación para materiales compuestos de fibras cortas son el moldeo por compresión, por inyección y por extrusión; estas técnicas se han descrito para polímeros sin reforzamiento en la Sección 16.13.

## 17.6 FASE FIBROSA

Una importante característica de muchos materiales, especialmente los frágiles, es que las fibras con diámetros pequeños son mucho más resistentes que el material macizo. Como se dijo en la Sección 13.7, la probabilidad de la presencia de una imperfección superficial crítica que conduzca a la rotura disminuye cuando aumenta el volumen específico. Este fenómeno se utiliza con ventaja en los compuestos reforzados con fibras. El material utilizado como fibra de refuerzo debe tener alta resistencia a la tracción.

En función de sus diámetros y características, las fibras se agrupan en tres categorías diferentes: *whiskers*, *fibras* y *alambres*. Los **whiskers** son monocristales muy delgados que tienen una relación longitud-diámetro muy gran-

**Tabla 17.3 Características de materiales reforzados con fibras**

<i>Material</i>	<i>Peso específico</i>	<i>Resistencia a la tracción</i> (psi × 10 <sup>3</sup> ) (MPa × 10 <sup>3</sup> )	<i>Resistencia específica</i> (psi × 10 <sup>6</sup> )	<i>Módulo elástico</i> psi × 10 <sup>6</sup> (MPa × 10 <sup>3</sup> )	<i>Módulo específico</i> (psi × 10 <sup>6</sup> )
<b>Whiskers</b>					
Grafito	2,2	3 (20)	1,36	100 (690)	45,5
Carburo de silicio	3,2	3 (20)	0,94	70 (480)	22
Nitruro de silicio	3,2	2 (14)	0,63	55 (380)	17,2
Óxido de aluminio	3,9	2-4 (14-28)	0,5-1,0	60-80 (415-550)	15,4-20,5
<b>Fibras</b>					
Aramida (Kevlar 49)	1,4	0,5 (3,5)	0,36	19 (124)	13,5
Vidrio E	2,5	0,5 (3,5)	0,20	10,5 (72)	4,2
Carbono <sup>a</sup>	1,8	0,25-0,80 (1,5-5,5)	0,18-0,57	22-73 (150-500)	15,7-52,1
Óxido de aluminio	3,2	0,3 (2,1)	0,09	25 (170)	7,8
Carburo de silicio	3,0	0,50 (3,9)	0,17	62 (425)	20,7
<b>Alambres metálicos</b>					
Acero alto en carbono	7,8	0,6 (4,1)	0,08	30 (210)	3,9
Molibdeno	10,2	0,2 (1,4)	0,02	52 (360)	5,1
Tungsteno	19,3	0,62 (4,3)	0,03	58 (400)	3,0

<sup>a</sup> Para designar estas fibras se utiliza el término "carbono" en vez de "grafito", ya que están compuestas de regiones de grafito cristalino y también de material no cristalino y de áreas con cristales defectuosos.

de. Como consecuencia de su pequeño diámetro, tienen alto grado de perfección cristalina y están prácticamente libres de defectos, y por ello tienen resistencias excepcionalmente elevadas; son los materiales de mayor resistencia. A pesar de sus elevados valores de resistencia, se utilizan poco como reforzantes porque son muy caros. Además, la incorporación de whiskers a la matriz resulta difícil y a menudo impracticable. Los whiskers pueden ser de grafito, carburo de silicio, nitruro de silicio y óxido de aluminio. En la tabla 17.3 se dan algunas características mecánicas de estos materiales.

Los materiales clasificados como **fibras** son policristalinos o amorfos y tienen diámetros pequeños; los materiales fibrosos son generalmente polímeros o cerámicas (p.ej., aramida, vidrio, carbono, boro, óxido de aluminio y carburo de silicio). La Tabla 17.3 también indica algunos datos de varios materiales utilizados como fibras.

Los alambres tienen diámetros relativamente grandes; los materiales típicos son el acero, el molibdeno y el tungsteno. Los alambres se utilizan como refuerzos radicales de acero en los neumáticos de automóvil, filamentos internos de los recubrimientos de cohetes espaciales y paredes de mangueras de alta presión.

## 17.7 FASE MATRIZ

La **fase matriz** de un material compuesto con fibras ejerce varias funciones. En primer lugar, une las fibras y actúa como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados; sólo una pequeña fracción del esfuerzo aplicado es resistido por la matriz. Además, la matriz

debe ser dúctil y, por otra parte, el módulo elástico de la fibra debe ser mucho mayor que el de la matriz. En segundo lugar, la matriz protege las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente. Estas interacciones introducen defectos superficiales capaces de originar grietas, que podrían producir fallos con esfuerzos de tracción relativamente bajos. Finalmente, la matriz separa las fibras y, en virtud de su relativa blandura y plasticidad, impide la propagación de grietas de una fibra a otra, que originaría fallos catastróficos; en otras palabras, la matriz actúa como una barrera que evita la propagación de grietas. Aunque algunas fibras individuales se rompan, la rotura total del material compuesto no ocurrirá hasta que se hayan roto gran número de fibras adyacentes, que forman un agregado de tamaño crítico.

Es esencial que la adherencia de la unión entre fibra y matriz sea elevada para minimizar el arrancado de fibras. En efecto, la resistencia de la unión tiene gran importancia en el momento de seleccionar la combinación matriz-fibra. La resistencia a la tracción final del compuesto depende, en gran parte, de la magnitud de esta unión; una unión adecuada es esencial para optimizar la transmisión de esfuerzos desde la plástica matriz a las fuertes fibras.

Generalmente sólo se utilizan polímeros y metales como matriz, porque son materiales dúctiles. El aluminio y el cobre son los metales más utilizados para ser reforzados con fibras. Sin embargo, los polímeros se utilizan como material matriz en la mayoría de las aplicaciones de los materiales compuestos debido a sus propiedades y a la facilidad de fabricación. Casi todos los polímeros termoplásticos y termoestables se utilizan como matriz.

## 17.8 MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRA DE VIDRIO

La fibra de vidrio es un material compuesto consistente en fibras continuas o discontinuas de vidrio embebidas en una matriz plástica; este compuesto se produce en gran cantidad. La composición del vidrio que generalmente se trefila en fibra (a veces denominado Vidrio E) se da en la Tabla 14.1. El vidrio se utiliza como material de refuerzo debido a las siguientes razones:

1. Es fácilmente hilable en fibras de alta resistencia.
2. Es fácilmente disponible y se puede aplicar económicamente para producir plástico reforzado con vidrio utilizando una gran variedad de técnicas de fabricación de materiales de compuestos.
3. Como fibra es relativamente fuerte y, cuando está embebido en una matriz plástica produce un compuesto con muy alta resistencia específica.
4. Cuando está unido a varios plásticos se obtienen materiales compuestos químicamente inertes muy útiles en una gran variedad de ambientes corrosivos.

Las características superficiales de la fibra de vidrio son de extrema importancia porque los defectos superficiales afectan a las propiedades de tracción, como se ha discutido en la Sección 13.7. Los defectos superficiales se generan por fricción o por abrasión de la superficie con otros materiales duros. Además, las superficies de vidrio expuestas a la atmósfera convencional, incluso durante períodos cortos de tiempo, tienen generalmente una capa superficial debilitada que interfiere en la unión con la matriz. Las fibras

recién solidificadas se suelen recubrir durante el hilado con un material que protege la superficie del deterioro y facilita la unión entre la fibra y la matriz.

Gran número de diferentes materiales plásticos se utilizan como matriz de la fibra de vidrio, pero el más común es el poliéster. Recientemente ha aparecido un compuesto formado por una matriz de nilón reforzada con fibra de vidrio; este material es extremadamente fuerte y altamente resistente al impacto.

Este grupo de materiales tiene algunas limitaciones. A pesar de tener elevada resistencia, no son muy rígidos y por este motivo no se aplican como miembros estructurales de, por ejemplo, aviones y puentes. La mayor parte de los materiales de fibra de vidrio tienen temperaturas de servicio inferiores a 200°C; a temperaturas superiores la mayoría de los polímeros empiezan a fluir y a deteriorarse. La temperatura de servicio puede llegar hasta los 300°C al utilizar fibras de sílice fundida de alta pureza y matriz de resinas de poliamida.

Las principales aplicaciones de la fibra de vidrio son: carrocerías de automóvil y de navíos, tuberías de plástico, recipientes para almacén y suelos industriales. La industria del transporte utiliza cada vez más los plásticos reforzados con fibra de vidrio con la finalidad de disminuir el peso del vehículo y de ahorrar combustible. La industria del automóvil aparece como la destinataria de nuevas aplicaciones de la fibra de vidrio.

## 17.9 OTROS MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ PLÁSTICA REFORZADA CON FIBRA

Los plásticos impregnados con otros materiales fibrosos (el carbono es el más común) también forman materiales compuestos. La Tabla 17.3 indica que el carbono en forma de fibra tiene un módulo específico mucho mayor que el vidrio. El carbono tiene también mayor resistencia a elevada temperatura y a ambientes corrosivos, pero es más caro y sólo se utiliza como fibra corta. La industria aeronáutica utiliza compuestos reforzados con carbono para fabricar los componentes estructurales de sus nuevos aviones con el fin de disminuir el peso. Los aviones contruidos con fibras de carbono se espera que sean de un 20 a un 30% más ligeros que los contruidos con láminas metálicas.

Varios plásticos impregnados con fibras de boro también se utilizan como materiales compuestos. Por ejemplo, las palas del rotor de algunos helicópteros se fabrican utilizando resina epoxi con fibras de boro.

Se ha empezado a seleccionar una nueva generación de fibras de aramida polimérica de alta resistencia para formar materiales compuestos utilizados como componentes estructurales de baja densidad. Las principales aplicaciones de estos compuestos radican en la producción de naves espaciales, aviones, barcos y equipos deportivos. La investigación se dirige hacia la posibilidad de utilizar carburo de silicio ( $\text{SiC}$ ) y nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) para endurecer matrices plásticas.

Entre estos materiales técnicamente avanzados también se incluyen los compuestos carbono-carbono, formados por fibras de carbono embebidas en una matriz de resina carbonizada; este material se diseña principalmente para aplicaciones aeroespaciales de alta temperatura.

### 17.10 MATERIALES COMPUESTOS MATRIZ METÁLICA-FIBRA

La mayoría de los metales son dúctiles y se utilizan como matriz en los compuestos reforzados con fibras; sin embargo, en la práctica su aplicación suele ser limitada. Recientemente han aparecido en el ámbito industrial compuestos con matriz de aluminio, de cobre y de titanio reforzados con fibras de carbono, de carburo de silicio y de boro, y también con fibras metálicas. Las concentraciones de fibra suelen ser del orden del 20 al 50% en volumen. Probablemente el metal reforzado con fibras más utilizado sea el compuesto aluminio-boro. Las fibras continuas de boro se preparan depositando una capa delgada de boro sobre un hilo delgado de tungsteno ( $10\ \mu\text{m}$  de diámetro). Esta fibra se recubre con una delgada capa de carburo de silicio para impedir indeseables reacciones entre el boro y el aluminio.

Los compuestos de matriz metálica se utilizan a temperaturas de servicio mayores que las de los de matriz polimérica. Además, la resistencia específica y el módulo específico adquieren elevados valores debido a la densidad relativamente baja de la matriz metálica. Esta combinación de propiedades convierte a estos materiales en idóneos para aplicaciones espaciales y en nuevos motores.

La fluencia a elevada temperatura y las propiedades de rotura de algunas superaleaciones (aleaciones base Ni y Co) mejoran reforzándolas con fibras de metales refractarios tales como el tungsteno. De este modo se mantiene la excelente resistencia a la oxidación a elevada temperatura y también la resistencia al impacto. Este material se incorpora en la fabricación de turbinas para turborreactores.

### 17.11 MATERIALES COMPUESTOS HÍBRIDOS

Un material compuesto reforzado con fibras relativamente nuevo es el denominado **híbrido**, que se obtiene utilizando dos o más clases diferentes de fibras en una única matriz; los híbridos tienen una mejor combinación de propiedades que los compuestos que sólo contienen un tipo de fibra. Se utilizan una gran variedad de materiales, tanto para las fibras como para la matriz, pero la combinación más extendidas son las fibras de carbono y de vidrio embebidas en una matriz polimérica. Las fibras de carbono son fuertes y relativamente rígidas y originan reforzamiento con baja densidad; sin embargo son caras. Las fibras de vidrio son baratas pero no tienen la rigidez de las fibras de carbono. El compuesto híbrido vidrio-carbono es más fuerte, más tenaz, más resistente al impacto y más barato de fabricar que los plásticos comparables reforzados con carbono o solamente con vidrio.

Existen varios procedimientos para mezclar dos tipos diferentes de fibras, los cuales afectan en última instancia a las propiedades generales del compuesto. Por ejemplo, todas las fibras se pueden alinear y mezclar íntimamente o se pueden laminar en capas alternadas de los dos tipos de fibras. En prácticamente todos los híbridos las propiedades son anisotrópicas.

Si se aplica un esfuerzo de tracción a un compuesto híbrido, la rotura no es catastrófica (no suele ocurrir súbitamente). Las fibras de carbono son las primeras que se rompen y, a partir de ese instante, el esfuerzo se transfiere a las fibras de vidrio. Una vez rotas, las fibras de vidrio la fase matriz debe soportar el esfuerzo aplicado. El compuesto se rompe al fallar la fase matriz.

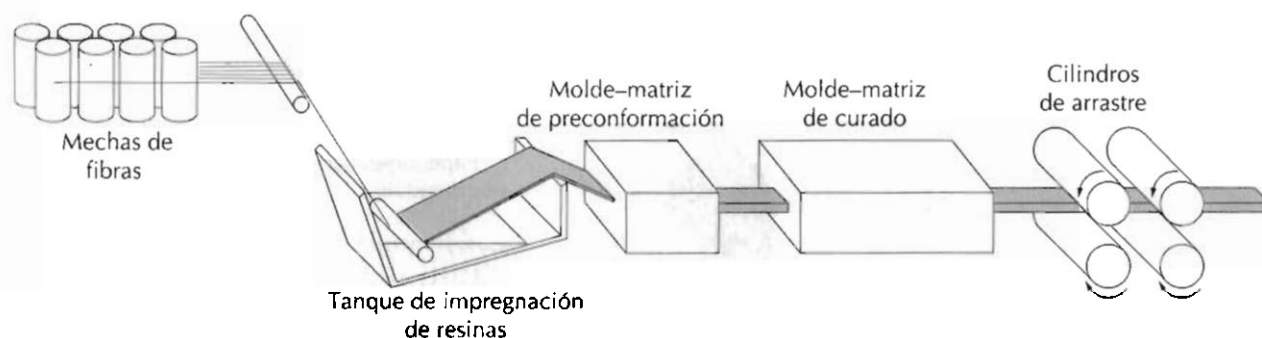


Figura 17.9 Diagrama esquemático del proceso de pultrusión.

Las principales aplicaciones de los compuestos híbridos son: componentes estructurales de baja densidad para transporte aéreo, marítimo y terrestre, artículos deportivos y componentes ortopédicos de baja densidad.

## 17.12 CONFORMACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

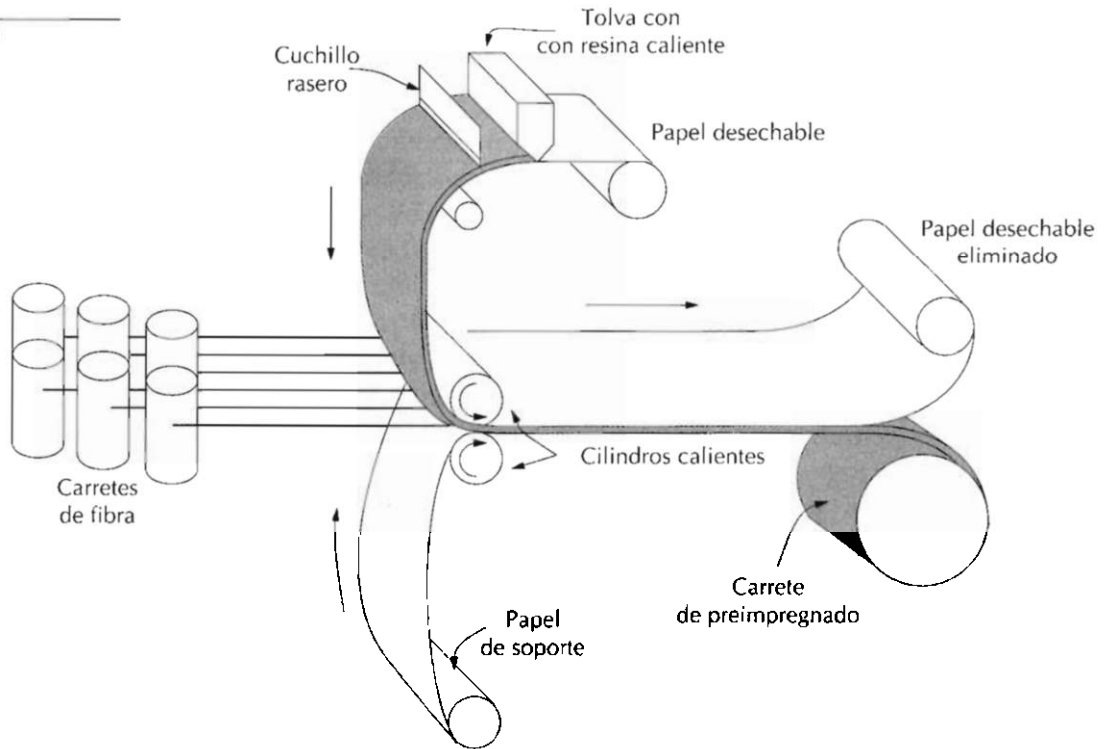
Para fabricar plásticos reforzados con fibras que satisfagan las especificaciones de diseño, las fibras deben estar uniformemente distribuidas en la matriz y, en muchos casos, deben estar orientadas en la misma dirección. En esta sección se discuten las nuevas técnicas desarrolladas para conformar estos materiales: pultrusión, bobinado de filamentos y procesos de producción con preimpregnados.

### 17.12.1 Pultrusión

La *pultrusión* es una técnica desarrollada para fabricar componentes de forma alargada y sección constante (p.ej., barras, tubos, vigas, etc.). En esta técnica, ilustrada esquemáticamente en la Figura 17.9, *mechas*<sup>1</sup> de fibras continuas se impregnan primero con una resina termoestable y luego se las hace pasar (por tracción) a través de un molde-matriz de acero que las conforma en una preforma y establece la relación resina/fibra. A continuación, el material pasa a través de un molde-matriz de curado que está mecanizado de forma precisa para que imparta la forma final deseada. Este molde-matriz también se calienta para iniciar el curado de la resina. Un mecanismo de tracción arrastra el material a través de los moldes y también determina la velocidad de producción. Los tubos y los perfiles huecos se conforman aplicando un mandril en el centro del perfil. Las fibras de vidrio, de carbono y de aramida, en proporciones comprendidas entre un 40 y un 70% en volumen, son los principales reforzamientos. El material de la matriz del compuesto suele ser poliéster, ésteres vinílicos o resinas epoxi.

La pultrusión es un proceso continuo susceptible de automatizarse; las velocidades de producción son relativamente elevadas y el coste efectivo muy bajo. Se consiguen perfiles de longitud ilimitada con una gran variedad de formas.

<sup>1</sup> Una mecha es un conjunto de fibras continuas, separadas y no retorcidas que se arrastran juntas en forma de hebras paralelas.



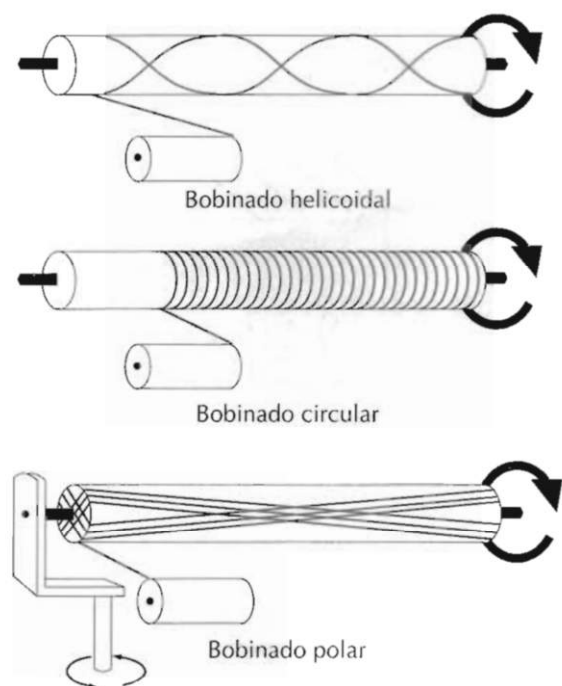
**Figura 17.10** Diagrama esquemático del proceso de producción de cinta de preimpregnado utilizando polímeros termoestables.

### 17.12.2 Procesos de producción con preimpregnados

El término **preimpregnado** se utiliza en la industria de los materiales compuestos para referirse a fibras continuas impregnadas previamente con una resina polimérica parcialmente curada. Este material se entrega a los usuarios en forma de cinta, los cuales moldean y curan totalmente el producto sin necesidad de añadir ninguna resina. Probablemente es el material compuesto más extensamente utilizado para aplicaciones estructurales.

El proceso de preimpregnación, representado esquemáticamente en la Figura 17.10 para polímeros termoestables, comienza con la alineación paralela de una serie de fibras continuas devanadas en carretes. Estas fibras se colocan entre dos hojas de papel, una desechable y otra de soporte, y se prensan mediante cilindros calientes en un proceso denominado "calandrado". La desechable se cubre con una delgada película de disolución de resina caliente de relativamente baja viscosidad para facilitar la impregnación de las fibras. Un "cuchillo rasero" de hoja metálica extiende la resina formando una película de espesor uniforme. El producto preimpregnado final —una delgada cinta que consiste en fibras continuas y alineadas embebidas en una resina parcialmente curada— se prepara para el empaquetamiento por bobinado en un núcleo de cartón. Como indica la Figura 17.10, la hoja de papel desechable se elimina al bobinar la cinta preimpregnada. Los espesores de estas cintas suelen estar comprendidos entre 0,08 y 0,25 mm y el ancho entre 25 y 1525 mm, mientras que el porcentaje en volumen de la resina representa entre 35 y 45%.





**Figura 17.11** Representación esquemática de las técnicas de bobinado de filamentos helicoidal, circular y polar. (De N. L. Hancox, editor, *Fibre Composite Hybrid Materials*.)

A temperatura ambiente la matriz termoestable experimenta reacciones de curado. Por este motivo se debe minimizar el tiempo de trabajo a temperatura ambiente. Tratados con cuidado, los preimpregnados de polímeros termoestables tienen una vida de unos seis meses.

Para la matriz se utilizan resinas termoestables y termoendurecibles y el material de refuerzo son fibras de carbono, vidrio o de aramida.

La fabricación propiamente dicha comienza con la aplicación de la cinta de preimpregnado sobre las superficies que actúan como molde. El número de capas que se aplica (después de quitar el papel de soporte) es el necesario para obtener el espesor deseado. La orientación de las fibras en las capas puede ser unidireccional pero generalmente la orientación de las capas se alterna para conseguir capas perpendiculares o multidireccionales. El curado final se logra aplicando simultáneamente calor y presión.

El proceso de aplicación de capas de preimpregnados se realiza manual o automáticamente. En el primer caso, el operario corta cintas de longitudes adecuadas y las coloca en la superficie de la matriz en la orientación deseada. En el segundo caso, las cintas se cortan con máquinas que luego las trasladan y colocan automáticamente en la matriz. La automatización es esencial para que las aplicaciones de muchos materiales compuestos sean rentables.

### 17.12.3 Bobinado de filamentos

El *bobinado de filamentos* es un proceso por el cual las fibras continuas de reforzamiento se colocan cuidadosamente según un modelo predeterminado, usualmente en forma de cilindro hueco. Las fibras, sean de filamentos individuales o mechas, se hacen circular por un baño de resina líquida y después se bobinan de modo continuo sobre un mandril mediante un equipo automático (Figura 17.11). Después de aplicar el número apropiado de ca-

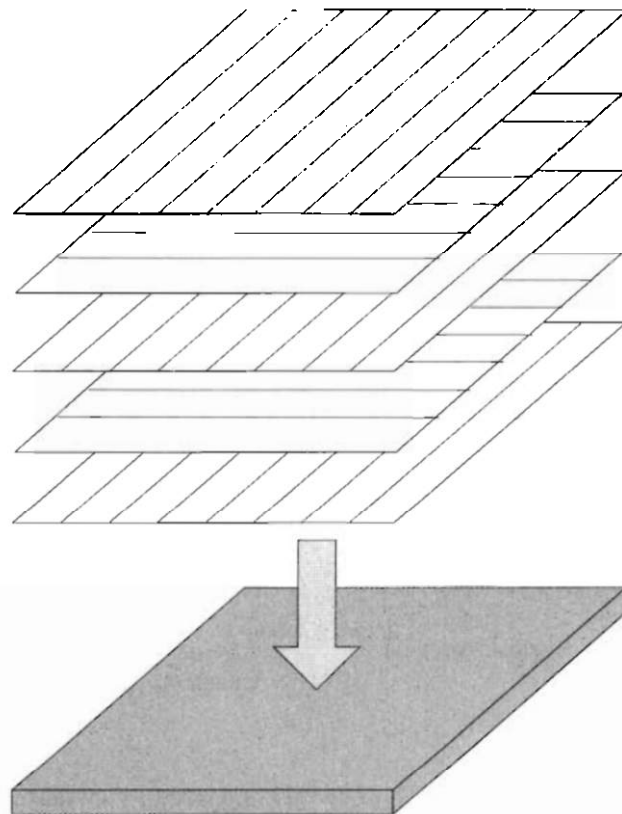


Figura 17.12 Apilamiento de capas reforzadas en sucesivas orientaciones para construir un material compuesto laminar.

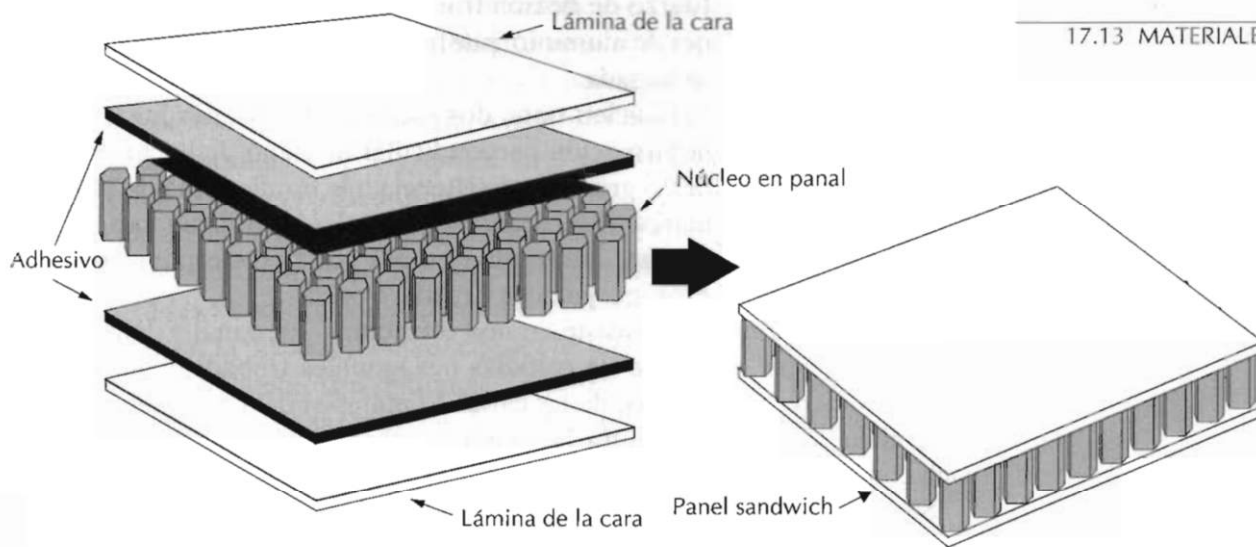
pas, se lleva a cabo el curado en un horno, o incluso a temperatura ambiente, y luego se saca el mandril. Como procedimiento alternativo, pueden bobinarse filamentos mediante cintas delgadas y estrechas de preimpregnados (es decir, mechas impregnadas) de menos de 10 mm de anchura.

Son posibles varios modelos de bobinado (p.e., circular, helicoidal y polar) para conseguir las propiedades mecánicas previstas. Piezas de filamentos bobinados tienen una relación resistencia-peso muy elevada. Con esta técnica también se consigue un alto grado de control sobre la uniformidad del bobinado y la orientación. Cuando se automatiza el proceso resulta muy económico. Las aplicaciones de las estructuras de filamentos bobinados incluyen: carcasas de motores de cohetes, tuberías y tanques para almacenaje y recipientes para elevadas presiones.

Estas técnicas de fabricación se empiezan a utilizar ahora para producir gran variedad de formas estructurales y no solamente limitadas a superficies de revolución (p.ej. vigas I). Esta tecnología avanza muy rápidamente debido al bajo coste.

## MATERIALES COMPUESTOS ESTRUCTURALES

Un **material compuesto estructural** está formado tanto por materiales compuestos como por materiales homogéneos y sus propiedades no sólo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los



**Figura 17.13** Diagrama esquemático de la fabricación de un panel sandwich con un núcleo en panal. (Reproducido con permiso de *Engineered Material Handbook*, Vol. 1, *Composites*, ASM International, Materials Park, OH, 1987).

elementos estructurales. Los compuestos laminares y los paneles sandwich son dos de los compuestos estructurales más comunes; a continuación se ofrece una visión relativamente superficial de estos materiales.

### 17.13 MATERIALES COMPUESTOS LAMINARES

Un **material compuesto laminar** consta de láminas o paneles que tienen una dirección preferente con elevada resistencia, tal como ocurre en la madera y en los plásticos reforzados con fibras continuas y alineadas. Las capas se apilan y luego se pegan entre sí, de modo que la orientación de la dirección de elevada resistencia varía en cada una de las sucesivas capas (Figura 17.12). Por ejemplo, en la madera contrachapada, las direcciones de elevada resistencia de las sucesivas capas forman ángulos rectos entre sí. Las láminas también se pueden construir utilizando materiales plásticos para la matriz y algodón, papel o fibra de vidrio tejida como material de refuerzo. Así, un material compuesto laminar es relativamente resistente en varias direcciones del plano bidimensional; sin embargo, la resistencia en una dirección determinada es, desde luego, menor que la que resultaría del alineamiento de todas las fibras en esa dirección. Un ejemplo de una estructura laminar relativamente compleja es la de los esquís modernos.

### 17.14 PANELES SANDWICH

Los **paneles sandwich** se consideran un tipo de materiales compuestos estructurales y consisten en dos láminas externas fuertes, o caras, separadas por una capa de material menos denso, o núcleo, que tiene baja rigidez y baja resistencia. Las caras resisten la mayor parte de las cargas en el plano, y

también cualquier esfuerzo de flexión transversal. Los materiales de las caras suelen ser aleaciones de aluminio, plásticos reforzados con fibras, titanio, acero y madera contrachapada.

Estructuralmente, el núcleo tiene dos funciones. En primer lugar separa las caras y resiste la deformación perpendicular al plano de la cara. En segundo lugar, aporta cierto grado de resistencia a la cizalladura a lo largo de los planos perpendiculares a las caras. Como núcleo se utilizan varios tipos de materiales y estructuras, como por ejemplo polímeros espumosos, cauchos sintéticos, cementos inorgánicos y madera balsa.

Otro popular núcleo consiste en una estructura "en panal": delgadas láminas dispuestas en forma de celdillas hexagonales trabadas con sus ejes perpendiculares a los planos de las caras. El material del panal puede ser similar al de las caras. La Figura 17.13 muestra una sección de un panel sandwich con un núcleo en panal.

Se construyen paneles sandwich para gran cantidad de aplicaciones: techos, suelos y paredes de edificios, y, en aviación, para revestimientos de alas, fuselajes y planos estabilizadores de cola de aviones.

## RESUMEN

Los materiales compuestos son materiales multifase producidos artificialmente para que tengan la combinación deseada de las mejores propiedades de las fases constituyentes. Generalmente una fase es continua (la matriz) y rodea completamente a la otra (la fase dispersa). En esta discusión los compuestos se clasificaron en: reforzados con partículas, reforzados con fibras y estructurales.

Los compuestos clasificados como reforzados con partículas incluye los consolidados por dispersión y los reforzados con partículas grandes. En los materiales compuestos consolidados por dispersión, el aumento de la resistencia se consigue mediante partículas muy pequeñas de fase dispersa, que inhiben el movimiento de las dislocaciones; esto es, el mecanismo del aumento de resistencia implica interacciones que se pueden tratar a nivel atómico. El tamaño de las partículas suele ser mayor en los compuestos con partículas grandes, cuyas características mecánicas mejoran por la acción reforzante.

El hormigón, un tipo de compuesto con partículas grandes, consta de un agregado de partículas unidas entre sí con cemento. En el caso del hormigón de cemento portland, el agregado consiste en arena y grava; la unión del cemento se desarrolla como consecuencia de las reacciones químicas entre el cemento portland y el agua. La resistencia mecánica del hormigón aumenta por el método del reforzamiento (p.ej., embebiendo en el hormigón fresco tubos y alambres de acero, etc.). El reforzamiento también se consigue por la imposición de esfuerzos compresivos adicionales utilizando técnicas de pretensado y postensado.

De los varios tipos de materiales compuestos, el potencial de la eficiencia del reforzamiento es mayor en los compuestos reforzados con fibras. En estos compuestos, la carga aplicada se transmite a las fibras y se distribuye entre ellas a través de la fase matriz, que puede ser moderadamente dúctil. Un significativo reforzamiento es sólo posible si la unión matriz-fibra es fuerte.

En función del diámetro, las fibras reforzantes se clasifican como whiskers, fibras y alambres. Como el reforzamiento se interrumpe en los extremos de las fibras, la eficiencia del reforzamiento depende de la longitud de la fibra. Para cada combinación fibra-matriz, existe una longitud crítica; la longitud de las fibras continuas excede grandemente este valor crítico, mientras que las fibras más cortas son discontinuas.

La disposición de las fibras también es relativamente importante para las características del compuesto. Las propiedades mecánicas de compuestos de fibras alineadas y continuas son altamente anisotrópicas. El reforzamiento y la resistencia en la dirección de alineamiento son máximos, mientras que en dirección perpendicular son mínimos. También se han desarrollado las expresiones de la regla de las mezclas de los compuestos en orientaciones longitudinal y transversal.

En los materiales compuestos con fibras cortas y discontinuas las fibras pueden estar alineadas o bien orientadas al azar. Los compuestos con fibras cortas y alineadas en la dirección longitudinal presentan resistencia y rigidez significativas. A pesar de algunas limitaciones en la eficiencia del reforzamiento, las propiedades de los compuestos con fibras cortas y orientadas al azar son isotrópicas.

El objetivo de muchos compuestos reforzados con fibras es la elevada resistencia específica y/o módulo específico. Por lo tanto, los materiales de la matriz son generalmente polímeros o metales con densidades relativamente bajas. El compuesto más común es el de fibra de vidrio embebida en poliéster (matriz polimérica). También es frecuente el uso de las fibras de carbono. La mejor combinación de propiedades se consigue con los compuestos híbridos, que son los que contienen al menos dos tipos diferentes de fibras.

Se han desarrollado técnicas de conformación de materiales compuestos con el fin de conseguir una distribución uniforme de la fibra y un alto grado de alineación. Con la pultrusión se fabrican perfiles de gran longitud y sección constante mediante mechas impregnadas de resina obligadas a pasar a través de un molde. Muchos elementos estructurales se fabrican con la técnica de aplicación (manual o automática) de capas de preimpregnados. Las cintas de preimpregnados se aplican sobre la superficie de una matriz de utillaje, donde terminan de curar por aplicación simultánea de presión y calor. Algunas estructuras huecas se pueden fabricar utilizando el procedimiento automático del bobinado de filamentos. En esta técnica, filamentos individuales o mechas impregnadas en resinas, y también cintas de preimpregnados, se bobinan sobre un mandril y luego se realiza la operación de curado de la resina.

Se vieron dos tipos generales de materiales compuestos estructurales: compuestos laminares y paneles sandwich. Las propiedades de los compuestos laminares son isotrópicas en las dos direcciones del plano. Esto se consigue mediante varias capas de materiales compuestos altamente anisotrópicos que se unen entre sí mediante un adhesivo. Las capas se disponen de forma que la dirección de alta resistencia varíe en cada una de ellas. Los paneles sandwich consisten en dos caras laminares fuertes y rígidas separadas por un material o estructura que forman el núcleo. Estas estructuras combinan, hasta cierto punto, las elevadas resistencia y rigidez con la baja densidad.

## TÉRMINOS Y CONCEPTOS IMPORTANTES

Cermet	Material compuesto estructural	Preimpregnado
Dirección longitudinal	Material compuesto híbrido	Principio de acción combinada
Dirección transversal	Material compuesto laminar	Regla de las mezclas
Fase fibra	Material compuesto reforzado con fibras	Resistencia específica
Fase matriz	Material compuesto reforzado con partículas	Semicurado
Fibra	Módulo específico	Whiskers
Hormigón	Panel sandwich	
Hormigón armado		
Hormigón pretensado		
Material compuesto consolidado por dispersión		

## BIBLIOGRAFÍA

- ASHBEE, K. H. G., *Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites*, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, PA, 1989.
- BROUTMAN, L. J. and R. H. KROCK, *Modern Composite Materials*, Addison-Wesley Publishing Co., Reading, MA, 1967.
- CHOU, T. W., R. L. MCCULLOUGH, and R. B. PIPES, "Composites," *Scientific American*, Vol. 255, No. 4, October 1986, pp. 192-203.
- Engineered Materials Handbook*, Vol. 1, *Composites*, ASM International, Metals Park, OH, 1987.
- FOLKES, M. J., *Short Fibre Reinforced Thermoplastics*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- HULL, D., *An Introduction to Composite Materials*, Cambridge University Press, Oxford, 1986.
- KELLY, A. and N. H. MACMILLAN, *Strong Solids*, 3rd edition, Clarendon Press, Oxford, 1986.
- PIGGOTT, M. R., *Load-Bearing Fibre Composites*, Pergamon Press, Oxford, 1980.
- RICHARDSON, M. O. W. (Editor), *Polymer Engineering Composites*, Applied Science Publishers, Ltd., London, 1977.
- STRONG, A. B., *Fundamentals of Composites Manufacturing, Materials, Methods, and Applications*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1989.
- VINSON, J. R. and T. W. CHOU, *Composite Materials and Their Use in Structures*, Applied Science Publishers, Ltd., London, 1975.
- WEETON, J. W. (Editor), *Engineers' Guide to Composite Materials*, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1986.

## PROBLEMAS Y CUESTIONES

- 17.1 Cite la diferencia general entre el mecanismo de aumento de resistencia mediante partículas grandes y mediante dispersión en los materiales compuestos reforzados con partículas.
- 17.2 Cite una analogía y dos diferencias entre endurecimiento por dispersión y consolidación por dispersión.
- 17.3 Las propiedades mecánicas del cobalto mejoran agregándole partículas diminutas de carburo de tungsteno (WC). Sabiendo que los módulos de elasticidad de estos materiales son  $2,0 \times 10^5$  MPa y  $7,0 \times 10^5$  MPa, respectivamente.

represente el módulo de elasticidad frente al porcentaje de volumen del WC en Co desde 0 a 100%, utilizando las expresiones de los límites superior e inferior.

- 17.4 Determine los valores máximo y mínimo de la conductividad térmica de un cermet que contiene un 90% en volumen de partículas de carburo de titanio (TiC) en una matriz de níquel. Suponga que las conductividades térmicas del TiC y del Ni son 27 W/m-K y 67 W/m-K, respectivamente.
- 17.5 Un material compuesto con partículas grandes se ha preparado agregando partículas de tungsteno en una matriz de cobre. Si las fracciones de volumen del tungsteno y del cobre son 0,60 y 0,40, respectivamente, calcule el límite superior de la rigidez específica de este compuesto con los datos siguientes:

	<i>Peso específico</i>	<i>Módulo de elasticidad (MPa)</i>
Cobre	8,9	$11,0 \times 10^4$
Tungsteno	19,3	$10,7 \times 10^4$

- 17.6 (a) ¿Cuál es la diferencia entre fase matriz y la fase dispersa en un material compuesto? (b) Compare las características mecánicas de la matriz y de la fase dispersa de los compuestos con fibras.
- 17.7 (a) ¿Cuál es la diferencia entre cemento y hormigón? (b) Cite tres importantes limitaciones que restringen el uso del hormigón como material estructural. (c) Explique tres técnicas utilizadas para aumentar la resistencia del hormigón mediante reforzamiento.
- 17.8 En un compuesto reforzado con fibra, (a) enumere tres funciones de la fase matriz, (b) compare las características mecánicas deseadas de la matriz y de la fase fibrosa y (c) cite dos razones que justifiquen que la unión entre la matriz y la fase dispersa deba ser fuerte.
- 17.9 En alguna combinación matriz epoxi-fibra de vidrio, la relación crítica longitud-diámetro de fibras vale 40. Utilizando los datos de la Tabla 17.3 determine la resistencia de la unión matriz-fibra.
- 17.10 (a) En un compuesto reforzado con fibra, la eficiencia del reforzamiento  $\eta$  depende de la longitud de la fibra  $l$  según

$$\eta = \frac{l - 2x}{l}$$

donde  $x$  representa la longitud de la fibra cuyo extremo no contribuye a la transferencia de la carga. Represente gráficamente  $\eta$  frente a  $l = 50$  mm, suponiendo que  $x = 1,25$  mm. (b) ¿Qué longitud de reforzamiento se necesita para conseguir una eficiencia de reforzamiento de 0,9?

- 17.11 Se proyecta fabricar un compuesto epoxi reforzado con fibras continuas y alineadas. El compuesto debe tener un máximo de 40% en volumen de fibras y los valores mínimos del módulo de elasticidad y de la resistencia a la tracción longitudinales deben ser  $5,5 \times 10^4$  y  $1,2 \times 10^3$  MPa, respectivamente. ¿Qué material es mejor candidato: fibras de vidrio, de carbono o de aramida? ¿Por qué? Suponga que la matriz epoxi tiene un módulo de elasticidad de  $3,1 \times 10^3$  MPa y una resistencia a la tracción de 69 MPa. Los datos de la fibra están en la Tabla 17.3; para el carbono suponga un valor medio entre los extremos.
- 17.12 Un compuesto reforzado con fibra continua y alineada consta de un 55% en volumen de matriz de policarbonato y 45% de fibra de aramida; las características mecánicas de estos dos materiales son las siguientes:

	Módulo de elasticidad [psi (MPa)]	Resistencia a la tracción [psi (MPa)]
Fibra de aramida	$19 \times 10^6$ ( $1,3 \times 10^5$ )	500 000 (3500)
Polycarbonato	$3,5 \times 10^5$ ( $2,4 \times 10^3$ )	8000 (55)

Calcule, para este compuesto, (a) la resistencia a la tracción longitudinal y (b) el módulo de elasticidad longitudinal.

- 17.13** Se proyecta fabricar un compuesto epóxido reforzado con fibra de carbono continua y orientada cuyo módulo de elasticidad mínimo sea  $6,9 \times 10^4$  MPa en la dirección de alineación de la fibra. El máximo peso específico permitido es 1,40. Con los datos indicados en la tabla, ¿es posible este material compuesto? ¿Por qué sí o por qué no? Suponga que el peso específico del compuesto se determina utilizando una relación similar a la Ecuación 17.10a.

	Peso específico	Módulo de elasticidad [psi (MPa)]
Carbono	1,80	$37 \times 10^6$ ( $2,6 \times 10^5$ )
Epoxi	1,25	$3,5 \times 10^5$ ( $2,4 \times 10^3$ )

- 17.14** Se proyecta fabricar poliéster reforzado con fibra de vidrio continua y alineada con una resistencia a la tracción mínima de 1250 MPa en la dirección longitudinal. El peso máximo específico posible es 1,80. Utilizando los datos adjuntos determine si es posible este compuesto y justifique su respuesta.

	Peso específico	Resistencia a la tracción [psi (MPa)]
Vidrio	2,50	$5 \times 10^5$ ( $3,5 \times 10^3$ )
Poliéster	1,35	$7,25 \times 10^3$ (50)

- 17.15** ¿Es posible fabricar un compuesto con matriz epoxi y fibra de aramida continua y orientada con módulos elásticos longitudinal y transversal de  $3,5 \times 10^4$  MPa y 5170 MPa, respectivamente? ¿Por qué sí o por qué no? Suponga que el módulo de elasticidad de la matriz epoxi es de  $3,4 \times 10^3$  MPa.
- 17.16** (a) Calcule y compare la resistencia específica del polycarbonato reforzado con 40% en volumen de fibra de vidrio (Tabla 12.1) y los siguientes materiales: un acero HSCA A656 grado 1 (Tabla 17.1b), un latón de cartuchería C26000 recocido (Tabla 12.6), una aleación de aluminio 5052 recocida (Tabla 12.7) y una aleación de magnesio HM31A envejecida artificialmente (Tabla 12.8). (b) Compare el módulo específico del mismo polycarbonato reforzado con los módulos del aluminio, del latón, del magnesio, del acero y del molibdeno. Utilice los datos de las Tablas C.1 y C.2 del apéndice C.
- 17.17** Los módulos de elasticidad en las direcciones longitudinal y transversal de un compuesto reforzado con fibras continuas y orientadas son  $3,31 \times 10^4$  y  $3,66 \times 10^3$  MPa, respectivamente. Si la fracción de volumen de la fibra es 0,30, determine los módulos de elasticidad de las fases matriz y fibra.
- 17.18** (a) Compruebe que la Ecuación 17.11, la expresión de la relación carga de la fibra-carga de la matriz ( $F_f/F_m$ ), es válida. (b) ¿Cuál es la relación  $F_f/F_c$  en términos de  $E_f$ ,  $E_m$  y  $V_f$ ?
- 17.19** En un compuesto de nilón 66 reforzado con fibras continuas y alineadas de carbono, la fibra soporta el 97% de la carga aplicada en la dirección longitudinal. (a) Utilizando los datos suministrados, determine la fracción de fibra que se necesita. (b) ¿Cuál será la resistencia a la tracción de este compuesto?



	Módulo de elasticidad [psi (MPa)]	Resistencia a la tracción [psi (MPa)]
Carbono	$37 \times 10^6$ ( $2,6 \times 10^5$ )	$2,5 \times 10^5$ ( $1,7 \times 10^3$ )
Nílon 66	$4 \times 10^5$ ( $2,8 \times 10^3$ )	$1,1 \times 10^4$ (76)

- 17.20** Suponga que el compuesto descrito en el Problema 17.12 tiene un área de  $480 \text{ mm}^2$  y está sometido a una carga longitudinal de 53 400 N. (a) Calcule la relación de carga fibra-matriz. (b) Calcule las cargas soportadas por las fases fibra y matriz. (c) Calcule la magnitud del esfuerzo en cada fase. (d) ¿Cuál es la deformación experimentada por el compuesto?
- 17.21** Un compuesto reforzado con fibra continua y alineada tiene una sección transversal de  $970 \text{ mm}^2$  y está sometido a una carga de tracción externa. Si las presiones soportadas por la fibra y por la matriz son 215 MPa y 5,38 MPa, respectivamente, la fuerza soportada por la fase fibra es 76 800 N y la deformación longitudinal total del compuesto es  $1,56 \times 10^{-3}$ , determine (a) la fuerza soportada por la matriz; (b) el módulo de elasticidad del material compuesto en la dirección longitudinal y (c) los módulos de elasticidad de las fases fibra y matriz.
- 17.22** Calcule la resistencia longitudinal de un compuesto con matriz epoxi y fibra de carbono alineada con una fracción de volumen de fibra de 0,20, suponiendo: (1) un diámetro medio de fibra de  $6 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ; (2) una longitud media de fibra de 8,0 mm; (3) una resistencia a la rotura de la fibra de  $4,5 \times 10^3 \text{ MPa}$ ; (4) una resistencia de la unión matriz-fibra de 75 MPa; (5) el esfuerzo de la matriz a la rotura del compuesto es 6,0 MPa y (6) una resistencia a la tracción de la matriz de 60 MPa.
- 17.23** Se proyecta construir un compuesto, con matriz epoxi y fibra de carbono alineada, que tenga una resistencia a la tracción longitudinal de 690 MPa. Calcule la fracción de volumen de fibra necesaria si (1) el diámetro medio y la longitud media de las fibras son 0,01 mm y 0,5 mm, respectivamente; (2) la resistencia a la rotura de la fibra es  $4 \times 10^3 \text{ MPa}$ ; (3) la resistencia de la unión matriz-fibra es 50 MPa y (4) el esfuerzo de la matriz a la rotura del compuesto es 70 MPa.
- 17.24** Calcule la resistencia a la tracción longitudinal de un compuesto de matriz epoxi y fibra de vidrio alineada, cuyo diámetro y longitud medios son 0,015 mm y 2,0 mm, respectivamente, y la fracción del volumen de la fibra es 0,25. Suponga que (1) la resistencia de la unión matriz-fibra es 100 MPa, (2) la resistencia a la rotura de la fibra es  $3,5 \times 10^3 \text{ MPa}$  y (3) el esfuerzo de la matriz a la rotura del compuesto es 5,5 MPa.
- 17.25** Se necesita fabricar un compuesto de matriz epoxi y fibra de vidrio discontinua y alineada que tenga una resistencia a la tracción longitudinal de 1200 MPa y una fracción de volumen de fibra de 0,35. Calcule la resistencia a la rotura de la fibra suponiendo que el diámetro medio y la longitud media son 0,015 mm y 5,0 mm, respectivamente. La resistencia de la unión matriz-fibra es 80 MPa y el esfuerzo de la matriz a la rotura del compuesto es 6,55 MPa.
- 17.26** (a) A partir de los datos del módulo de elasticidad del policarbonato reforzado con fibra de vidrio de la Tabla 17.1, determine el valor de la eficiencia de la fibra en el caso de 20, 30 y 40% de volumen de fibra. (b) Calcule el módulo de elasticidad para un 50% en volumen de fibra de vidrio.
- 17.27** Cite una característica deseable y otra no deseable de los compuestos reforzados con fibras (1) discontinuas y orientadas y (2) discontinuas y orientadas al azar.

- 17.28** (a) Cite cuatro razones que justifiquen el amplio uso de la fibra de vidrio como material de refuerzo. (b) ¿Por qué influye el estado superficial de la fibra de vidrio? (c) ¿Qué precauciones se toman para proteger la fibra de vidrio?
- 17.29** Cite la diferencia entre carbono y grafito.
- 17.30** (a) Cite varias razones que justifiquen el gran número de aplicaciones de los compuestos reforzados con fibra de vidrio. (b) Cite varias limitaciones de estos compuestos.
- 17.31** (a) ¿Qué es un compuesto híbrido? (b) Cite dos inconvenientes de los compuestos híbridos respecto a los de fibra normal.
- 17.32** (a) Escriba una expresión para el módulo elástico de un compuesto híbrido con todas las fibras orientadas en la misma dirección. (b) Calcule, mediante esta expresión, el módulo de elasticidad longitudinal de un compuesto híbrido formado por fibras aramida y de vidrio en fracciones de volumen de 0,25 y 0,35, respectivamente, en una matriz de resina de poliéster ( $E_m = 4 \times 10^3$  MPa).
- 17.33** Escriba una expresión general análoga a la Ecuación 17.17 para el módulo de elasticidad transversal de un compuesto híbrido alineado consistente en dos tipos de fibras continuas.
- 17.34** Describa brevemente los procesos de fabricación denominados pultrusión, bobinado de filamentos y procesos de producción con preimpregnados; cite ventajas e inconvenientes de cada uno.
- 17.35** Describa brevemente los compuestos laminares. ¿Cuál es la principal razón para fabricar estos materiales?
- 17.36** (a) Describa brevemente los paneles sandwich. (b) ¿Cuál es la principal razón para fabricar estos compuestos estructurales? (c) ¿Cuál es la función de las caras y del núcleo?