

MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRA

Vesselina Radeva *

“Los materiales naturales y los elaborados por el hombre se han convertido en una parte tan integral de nuestras vidas que con frecuencia lo damos por un hecho; los materiales se equiparan a la energía y a la información como recursos básicos de la humanidad. Aunque parezca que los materiales “no hacen nada”; son realmente la sustancia de trabajo de nuestra sociedad; desempeñan una función crucial no solo en nuestro modo de vida sino también en el bienestar y la seguridad de las naciones.”

Van Vlack

RESUMEN

Estos materiales compuestos (materiales en los que ambos componentes mantienen sus identidades al ser “mezclados”) difieren de la mayoría de los materiales de ingeniería en que sus propiedades mecánicas son altamente dependientes de la dirección de las cargas que se le aplican.

Materiales como estos se les llama anisotrópicos (tal como un pedazo de madera). Por lo tanto, es de considerable importancia para el ingeniero el tener una idea de esta dependencia direccional para que estos materiales puedan ser utilizados de una manera correcta y segura.

PALABRAS CLAVE

Compuesto, anisotropía, fibras, matriz.

ABSTRACT

These compound materials (materials in which both components maintain their “mixed” identities while being blended) differ from most of the engineering mate-

* Departamento de Ingeniería. Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC).
República Dominicana.
Email: vussy@intec.edu.do

rials in which their mechanical properties are highly dependant of the direction of the loads that are applied to them. Materials like these are called anisotropic (like a piece of wood). Therefore, it is of considerable importance for the engineer to have an idea of this directional dependency so that these materials can be used in a correct and safe way.

KEYWORDS

Compound, anisotropy, fibers, matrix

Conocimientos previos

Fibras – elementos de forma larga y cilíndrica de gran resistencia y/o boro, tungsteno, óxido de aluminio, etc...., con un diámetro entre 6 y 100 micrones (1 micrón = 10^{-6} m).

Matriz – material que ata las fibras y transmite cargas a las mismas a través de uniones químicas o mecánicas. Los materiales de matriz de uso más común son los polímeros, tales como las resinas de epoxia endurecidas por calor y metales de bajo punto de fundición como el aluminio.

Este laboratorio requiere un conocimiento general de los conceptos y parámetros que conllevan el comportamiento elástico de materiales, a saber, tensión, módulo elástico y coeficiente de Poisson.

Objetivos

En este laboratorio, la data será recolectada para cumplir con los siguientes análisis concernientes a la caracterización y al comportamiento elástico de materiales compuestos reforzados con fibra.

1. Calcular la fracción en volumen de fibras, f_v , para una muestra de compuesto para secciones orientadas

- a) Perpendicular a las fibras y
- b) 45° a las fibras. Comparar estos dos valores y tomar en cuenta si hay algunas diferencias.

2. Calcular los módulos longitudinal y transversal, E_l y E_t , a partir de data provista para un compuesto de goma reforzado en nylon y comparar estos valores con aquellos observados en el laboratorio.

3. Calcular el módulo elástico, E , en diferentes ángulos (i.e. $=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$, y 75°) y graficar los valores como una función de θ . En la misma gráfica, trazar la curva teórica de la ecuación dada y comparar las dos.

4. Obtener el mayor coeficiente de Poisson V_{12} medido en los distintos ángulos y graficar los valores junto con la curva teórica para hacer una comparación.

5. Graficar los valores observados del módulo de acoplamiento de corte, β , como una función de θ .

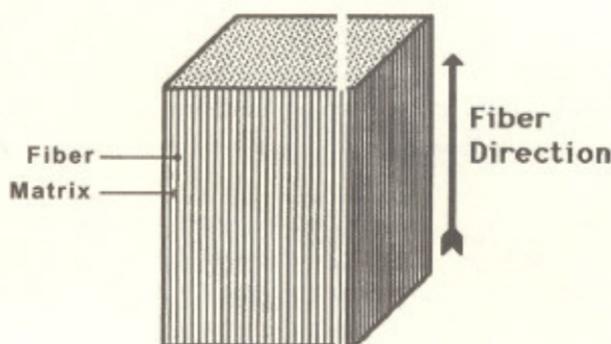


Fig. 1 Sección típica de un material compuesto reforzado con fibra, las fibras son continuas orientadas a una misma dirección.

Determinación del contenido de fibra

El contenido de fibra de un determinado compuesto es generalmente expresado como la fracción en volumen de fibra y se denota f_v . La mayoría de los compuestos estructurales contienen entre 50 y 60 por ciento de fibra ($0.5 < f_v < 0.6$) mientras que compuestos en otras aplicaciones pueden contener menos.

Un método utilizado para determinar el contenido de fibra es llamado método de conteo de puntos. Este consiste en colocar una parrilla o un grupo de puntos sobre un foto micrográfico de una sección transversal pulida del material compuesto. Favor notar que para poder obtener una medición precisa, los puntos deben ser pequeños en comparación con el diámetro de la fibra. Al contar el número de puntos o intersecciones que caen sobre la fibra y luego dividiendo por el número total de puntos, la fracción del área es calculada.

Refiriéndonos a la Fig.2, el número de puntos que caen dentro del área de fibra es alrededor de 155 (no todo el mundo contará la misma cantidad, aún se le dé la misma figura). El número total de puntos en el grupo es (exactamente) 630 así que el área de fracción de fibra en este ejemplo es $155/630 \approx 0.25$.

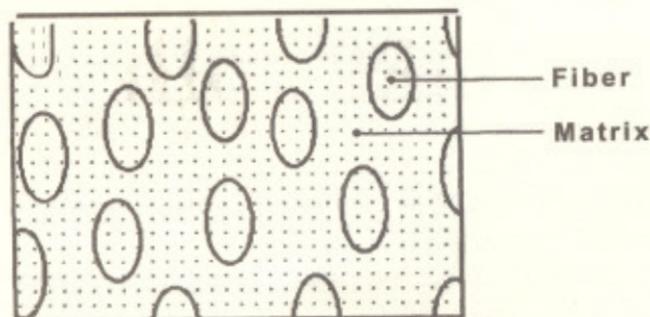


Fig. 2 Ejemplo del método de conteo de puntos para un compuesto reforzado con fibra.

Notar que las áreas de fibras son elípticas; ¿significa esto que estas fibras no son circulares en la sección transversal?, ¿Podrían ellas ser circulares pero cortadas en un ángulo?, ¿Podría el ángulo al cual las fibras están cortadas cambiar el área de fracción de fibra obtenida por el método de conteo de puntos?

Considere el caso donde las fibras están cortadas en el ángulo correcto según su longitud. Las áreas serían circulares y el área de fracción podría ser obtenida como dijimos anteriormente. Claramente, esta área de fracción A_f es la misma que la fracción de volumen f_v . Es más, no importa a que ángulo las fibras sean cortadas; aún las fibras estén orientadas al azar, tal como un compuesto que contiene fibra troceada, el método de conteo de puntos da, directamente, la fracción de volumen de los componentes.

En este laboratorio, sin embargo, el área total de fibra será determinado al contar el número de fibras que intersecan la superficie de la muestra y multiplicando por el área de la fibra. Esto es posible debido al relativamente gran tamaño del reforzamiento de nylon y el bajo contenido de fibra. Este método será utilizado en una superficie orientada perpendicularmente a las fibras y otra orientada a 45° de las fibras.

Comportamiento elástico

Como mencionamos anteriormente, el comportamiento mecánico de materiales compuestos reforzados con fibra es altamente dependiente de la dirección en que una propiedad particular es medida. Por ejemplo, el módulo elástico a lo largo de las fibras, E_l es drásticamente diferente al módulo elástico transversal a las fibras, E_t . Las primeras aproximaciones de estos módulos pueden ser calculadas a partir de las constantes elásticas de los materiales componentes, considerando los modelos de isostrain e isostress mostrados en la Fig.3

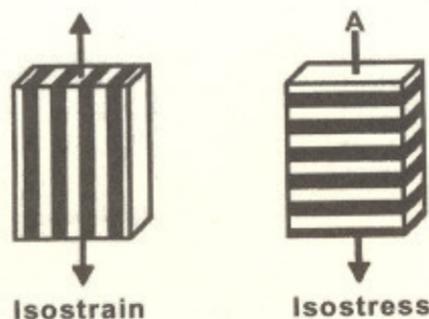


Fig. 3 Geometría de materiales compuestos unidireccionales idealizados

La ecuación para el módulo longitudinal (a lo largo de las fibras) puede ser derivada del modelo isostrain como:

$$E_t = E_f f_f + E_m f_m$$

Donde:

E_f = Módulo elástico de las fibras

f_f = Fracción volumétrica de la fibra en el compuesto

E_m = Módulo elástico de la matriz

f_m = Fracción volumétrica de matriz = $(1 - f_f)$

Esta ecuación se le conoce como la regla de mezclas e implica que la contribución de un componente es directamente proporcional a su fracción de volumen. Claramente, la ecuación para la densidad del compuesto sería de la misma forma.

La ecuación para el módulo transversal (perpendicular a la dirección de la fibra) puede ser derivada del modelo isostress como:

$$1/E_t = f_f/E_f + f_m/E_m$$

Esta ecuación es conocida como la regla de mezclas inversa. Ambas ecuaciones son mostradas en la Fig.4 para ilustrar el efecto del contenido de fibra en el módulo elástico. Notar que el módulo transversal no se

incrementa apreciablemente más allá del modulo del componente menos rígido, la matriz, al contenido de fibra usualmente encontrado en compuestos dirigidos.

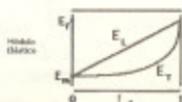


Fig. 4 Módulo Elástico versus volumen de fracción de fibra para los modelos isostress e isostrain.

Nos podemos referir a las direcciones l y t como los ejes de material y, si el compuesto es tensado en cualquiera de estas direcciones, las tensiones correspondientes pueden ser calculadas (a la izquierda en la Fig.5) Sin embargo, si la tensión es aplicada en un ángulo agudo, θ , a las fibras (a la derecha en la Fig.5), la respuesta elástica a lo largo de los ejes de distribución de carga (1, 2) puede ser calculada a partir de las propiedades medidas a lo largo de los ejes de material (l y t).

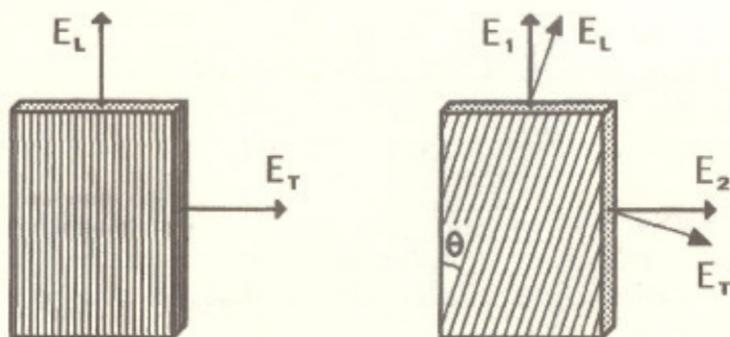


Fig. 5 Ilustración de geometrías de material (l y t) y carga/ distribución de carga (1,2).

$$E_1 = E_l [\cos^4\theta + E_f/E_t \sin^4\theta + 1/4(E_f/G_{lt} - 2V_{lt}) \sin^2 2\theta]^{-1}$$

$$E_2 = E_l [\sin^4\theta + E_f/E_t \cos^4\theta + 1/4(E_f/G_{lt} - 2V_{lt}) \sin^2 2\theta]^{-1}$$

Notar que en las ecuaciones anteriores los parámetros de materiales necesitados incluyen θ , G_{it} y V_{it} , E_1 y E_t . El valor de E_1 puede ser calculado a partir de la ecuación de la regla de mezclas dada anteriormente y el valor obtenido será satisfactoriamente cerca de la realidad (aunque el compuesto esté hecho de fibras en una matriz en vez de planchas alternas como se utiliza en el modelo isostrain).

Sin embargo, el valor de E_t calculado a partir de la ecuación de la regla de mezclas inversa no estará cerca de la realidad porque el modelo isostress (planchas amontonadas) es una simplificación excesiva de un compuesto de fibra. Similarmente, ecuaciones para G_{it} (el modulo de corte obtenido cuando una torsión es aplicada en el plano perpendicular a la dirección de la fibra) no siempre dan valores precisos; por lo tanto, E_t y G_{it} deben ser medidos en el laboratorio. El mayor coeficiente de Poisson, V_{it} (un esfuerzo longitudinal causa una tensión en la dirección transversa), puede ser calculado confiablemente a partir de una ecuación tipo la regla de mezclas tal como el El.

$$V_{it} = V_{it} f_t + V_{im} f_m$$

¿Y qué del V_{it} (un esfuerzo transversa causando una tensión en dirección longitudinal)?

¿Esperarías que fuera igual al V_{it} ? Es verdaderamente diferente pero fácilmente calculable como sigue:

$$V_{it} = (E_t/E_1) V_{it}$$

La transformación del V_{it} (a lo largo de los ejes de material) al V_{i2} (a lo largo de los ejes de distribución de carga) es dada en la ecuación siguiente:

$$V_{i2} = E_t/E_1 [V_{it} - 1/4(1+2V_{it} + E_t/E_1 - E_t/G_{it}) \text{sen}^2 2\theta]$$

Uno de los fenómenos más importantes que ocurren sobre la distribución de carga fuera de eje de compuestos unidireccionales reforzados con fibra es la producción de una deformación de corte a partir de un estado de pura tensión. Como se ilustra en la Fig.6, si un ángulo de referencia de 90° es inscrito en la muestra (antes de cargar), este ángulo cambiará a medida que la muestra sea cargada uniaxialmente, indicando la existencia de una deformación de corte.

Claramente, esto no ocurriría con un material isotrópico (un cuadrado se convertiría en un rectángulo pero los ángulos no cambiarían) o con una muestra de un compuesto cargado a lo largo de los ejes del material ($\theta = 0^\circ$ ó $\theta = 90^\circ$), pero cuando θ está entre 0° y 90° , una deformación de corte usualmente ocurre. Puede que sea positiva, o negativa, o cero, dependiendo del valor de θ , las propiedades elásticas de los componentes y el contenido de fibra del compuesto.

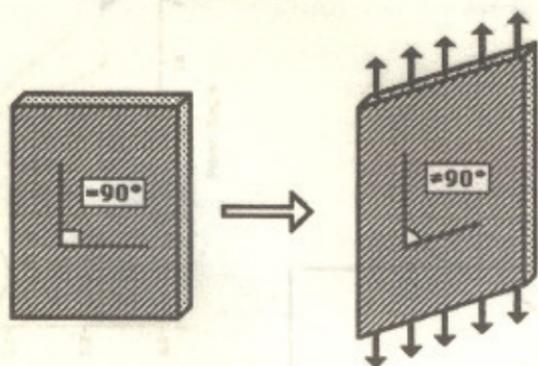


Fig.6 Ilustración de una deformación de corte producida por una distribución de carga de tensión de un compuesto de fibra.

La cantidad de cambio en el ángulo de 90° (medido en grados) que ocurre sobre la tensión del compuesto es la deformación de corte Y_{12} . Para el propósito de nuestro simplificado experimento, definiremos un coeficiente de acoplamiento de deformación β , para relacionar la tensión normalmente aplicada σ_1 , con la deformación de corte resultante, tal como sigue:

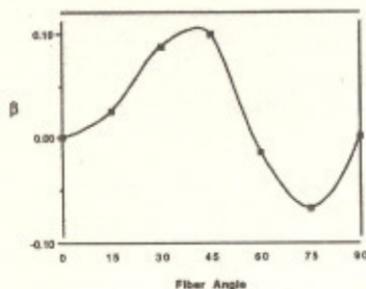
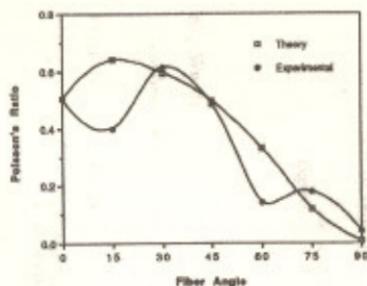
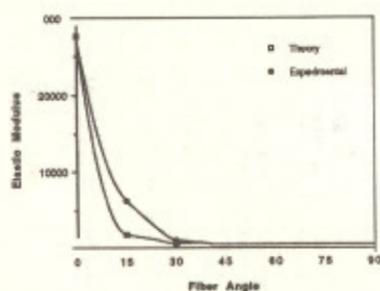
$$\beta = Y_{12} / \sigma_1$$

Notas del instructor

Las muestras de compuesto utilizado para este experimento consisten de 7% de volumen de cuerda de nylon en una matriz de goma curada. Se puede sugerir contactar a un fabricante de llantas para este tipo de material no curado, reforzado unidireccionalmente. Un experimento similar puede ser llevado a cabo con fibra de vidrio/epoxia o grafito/epoxia, pero las desviaciones podrían ser solamente medibles con un medidor de deforma-

ción. Otros materiales de planchas reforzadas comercialmente disponibles pueden bastar, siempre y cuando la extensibilidad sea suficientemente alta para permitir la medición manual de la distorsión de corte y deformación.

Para este ejercicio, los estudiantes deben medir las elongaciones (y contracciones transversas) con un Calibrador Dial y las deformaciones de corte con un transportador. Muestras de posibles resultados son presentadas en lo siguiente.



Breve mirada a los materiales compuestos

Un material compuesto es un sistema de materiales construidos por la mezcla o combinación de dos o más micro o macro-constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente asociables entre sí.

La importancia de un material compuesto radica en que dos o más materiales distintos se combinan para formar un material compuesto cuyas propiedades sean superiores que las de sus componentes.

Los compuestos se clasifican en tres categorías:

- 1) Con partículas, el concreto; (mezcla de cemento y grava).
- 2) Con fibras, la fibra de vidrio, (la fibra de vidrio incrustada en un polímero).
- 3) Laminares (la madera contrachapada o triplay)

Compuestos reforzados por dispersión

Los materiales endurecidos por dispersión contienen dispersoides, (partículas de óxido metálicos muy pequeñas 10 a 250 nm de diámetro) en una matriz de metal. Los mismos interfieren con el deslizamiento, dando buenas propiedades mecánicas a temperaturas elevadas. (Bloquean el movimiento de las dislocaciones y producen un pronunciado efecto de endurecimiento, su resistencia a la termofluencia es superior a la de los metales y aleaciones).

EJEMPLO Y APLICACIONES DE COMPUESTOS ENDURECIDOS POR DISPERSION	
Sistemas	Aplicaciones
Ag-CdO Al-Al ₂ O ₃ Be-BeO C ₀ -ThO ₂ , Y ₂ O ₃ Ni-20% Cr-ThO ₂ Pb-PbO Pt-ThO ₂ W-ThO ₂ , ZrO ₂	Materiales para contactos eléctricos Uso posible en reactores nucleares Reactores aeroespacial y reactores nucleares Posible uso en materiales magnéticos resistentes a la termofluencia Componentes turborreactores Rejillas para batería Filamentos, componentes eléctricos Filamentos, calefactores

Materiales compuestos particulados que contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no bloquean con eficacia el deslizamiento se diseñan para producir combinaciones poco usuales de propiedades (no se

puede mejorar la resistencia); algunas de estas propiedades dependen solo de las cantidades y propiedades relativas de los constituyentes individuales.

La regla de la mezcla ayuda a determinar estas propiedades con exactitud.

Regla de la mezcla

Determinación de la densidad

$$\rho_c = \sum (f_i \rho_i) = f_1 \rho_1 + f_2 \rho_2 + \dots + f_n \rho_n$$

ρ_c = densidad del compuesto

$\rho_1 \rho_2 \dots \rho_n$ = densidad de cada constituyente

$f_1 f_2 \dots f_n$ = fracción volumétrica de cada constituyente

COMPUESTOS PARTICULADOS VERDADEROS

COMPUESTOS DE	EJEMPLO	PROPIEDADES	APLICACIONES
MATRIZ METÁLICA contienen partículas cerámicas o metálicas	Carburo cementado o cements	proporcionan dureza, mejor resistencia al desgaste, aseguran una buena conductividad eléctrica, buena tenacidad o buena resistencia a la corrosión	para herramientas de corte en procesos de maquinado
	WT carburo de tungsteno		
	plata reforzada con tungsteno abrasivos de diamante	conduce la corriente con eficacia y tiene resistencia al desgaste	contactos eléctricos en interruptores corte
COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA mayor rigidez, sumenta la resistencia al calor, sumenta la conductividad eléctrica, mantiene bajo peso, facilidad de fabricación e un bajo costo	el negro de humo en el caucho vulcanizado	los estadores pueden hacer más rígido al polímero y reducir los costos	en algunos polímeros se utilizan estadores como carbón de calcio, ésteres ácidos de vidrio y diversos arcillos. Introducir partículas de elastómero para mejorar la tenacidad de los polímeros.
	abrasivos de aluminio (Al_2O_3), Carburo de Si (SiC), Nitruro de Boro Cúbico (CBN)	tenacidad	discos de rectificado y de corte

Compuestos reforzados con fibras

En general, cuando no se especifica, se entiende por compuesto a aquel material formado por fibras rectas y largas situadas en el interior de una matriz que mantienen a las fibras unidas y distribuye los esfuerzos. Las fibras soportan la mayor parte de las cargas, mientras que la matriz se responsabiliza de la tolerancia al daño (golpes) y del comportamiento a fatiga. Una fibra es una multitud de fibras. Por lo tanto, lo que se ve a simple vista se llama bundle o yarn. Un bundle puede tener 3 310 a 12 103 fibras. Las fibras ofrecen sus mejores propiedades cuando trabajan en la dirección de la fibra, es decir, que en un caso ideal deberían alinearse las direcciones de las fibras con la dirección de la fuerza exterior.

Las fibras se sitúan en capas o laminas superpuestas en la dirección de espesor obteniendo estructuras que se llaman laminados. Las láminas nunca se superponen con la misma orientación. Se deberá estudiar a fondo la secuencia de apilación y orientación adecuada para cada caso. La secuencia de apilación y orientación tiene mas importancia incluso que las características físicas de las fibras y matriz y variando secuencia de apilado y orientación se pueden conseguir infinitos comportamientos. Jugando con estos parámetros se pueden conseguir comportamientos radicalmente diferentes en resistencias, rigidez, tolerancia al daño, estabilidad dimensional o de laminación.

En el calculo correcto de piezas de materiales compuestos, la geometría y el material (fibras, matriz, secuencia de apilado y angulación) deben diseñarse a la vez interactivamente. Obviamente el cálculo es mucho mas complicado que para materiales clásicos. Se deberá conocer a fondo el comportamiento ortotropo de los materiales compuestos para poder sacarles todo su rendimiento. Las fibras se pueden obtener como fibras secas o como pre-impregnados. La fabricación con preimpregnados es la que mejores calidades ofrece. A pesar que para su almacenamiento son necesarias temperaturas muy bajas y los ciclos de procesado son a alta temperatura y presión, es la forma más sencilla de la fabricación de materiales compuestos.

En general, la desventaja más clara de los materiales compuestos es el precio. Las características de los materiales y de los procesos encare-

cen mucho el producto. Para ciertas aplicaciones las bondades mecánicas como la alta rigidez específica (E/r), la buena estabilidad dimensional, la tolerancia a alta temperaturas, la resistencia a la corrosión, la ligereza o una mayor resistencia a la fatiga que los materiales clásicos compensan el alto precio.

Características

- Mejor resistencia a la fatiga
- Mejor rigidez
- Una mejor relación resistencia-peso
- Mayor resistencia a temperaturas elevadas
- Mayor resistencia.
- Mejor modulo de Young

Al igual que en el caso de los materiales compuestos particulados la regla de la mezcla dará siempre la densidad de los compuestos reforzados con fibra.

Regla de la mezcla

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_f \rho_f$$

ρ_c = Densidad del material compuesto

$f_m \rho_m$ = se refiere a la matriz

$f_f \rho_f$ = se refiere a la fibra

donde $f_m = 1 - f_f$

Si las fibras son continuas y unidireccionales, la regla predice con exactitud la conductividad térmica y eléctrica

$$K_c = f_m K_m + f_f K_f$$

K_c = Conductividad térmica del compuesto

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

σ_c = Conductividad eléctrica del compuesto

$$E_c = f_m E_m + f_f E_f$$

$E_{c//}$ = Módulo de elasticidad paralelo a las fibras

Cuando el esfuerzo aplicado es muy elevado la matriz casi no constituye a la fibra del material, entonces:

$$E_{c//} = f_f E_f$$

Si la carga es perpendicular a las fibras

$$1/E_{cpe} = f_m / E_m + f_f / E_f$$

Resistencia a la tensión de un material compuesto con fibras continuas y paralelas

$$TS_s = f_f TS_f + f_m \sigma_m$$

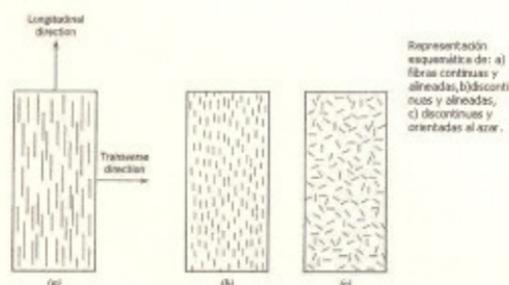
TS_f = resistencia a la tensión de la fibra

σ_m = esfuerzo que actúa sobre el material cuando las fibras se rompen

CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES PARA DISEÑAR LOS COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

Longitud y Diámetro de las fibras	La resistencia del compuesto mejora cuando la relación de forma (l/d) es grande, es decir fibras largas, con diámetros lo más pequeños posible para reducir los defectos
Cantidad de fibras	La fracción de volumen de fibra debe ser aprox. 80%, para incrementar la resistencia y la rigidez, si es mayor a este % las fibras no quedaran totalmente cubiertas por la matriz
Orientación de las fibras	Sus propiedades se pueden diseñar para soportar condiciones de carga diferentes, mediante arreglos ortogonales (capas de 00 /900) para obtener buena resistencia en dos direcciones perpendiculares con capas de 00 /+450 /900 proporcionan refuerzo en varias direcciones
Propiedades de las fibras	La fibra deberá tener una temperatura de fusión alta. Si el material se utilizara a temperaturas elevadas la resistencia específica y el modulo específico de la fibra son características importantes: <ul style="list-style-type: none"> • Resistencia específica =TS/r • Modulo específico= E/r
Propiedades de la matriz	<ul style="list-style-type: none"> • La matriz aporta en el control de las propiedades eléctricas, químicas y térmicas de un material compuesto. • Soporta las fibras manteniéndolas en su posición correcta; • Transfiere las cargas a las fibras; • Las protege de sufrir daños durante su manufactura y su uso; • Evita prolongación de grietas en las fibras a todo lo largo del compuesto. • Tiene el control sobre las propiedades eléctricas, comportamiento químico y el uso de temperaturas elevadas. <p>Las matrices poliméricas (Termoplásticos, termoestables) se utilizan para el reforzamiento con fibras de vidrio. Kevlar, Nylon y polietileno</p> <p>Las matrices metálicas (Al, Mg, Cu, Ni y aleaciones de Compuestos intermetálicos) para reforzar fibras cerámicas y metálicas. Permiten que el compuesto funcione a temperaturas altas. (Be, Boro, W)</p> <p>Los compuestos de matriz cerámica, tienen buena propiedad a temperaturas elevadas y son más ligeros que los de matrices metálicas de alta temperatura. (Al₂O₃, B₄C, SiC, ZrO₂, Cr, Grafito, Si₃N₄)</p> <p>Las fibras deben estar firmemente unidas al material de la matriz, para evitar que las fibras puedan salirse de la matriz durante la carga reduciendo la resistencia y la resistencia a la fractura del compuesto. Para mejorar la unión se pueden utilizar recubrimientos especiales como, el silicio, carburo de silicio</p>
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 fallas permanentes

ORIENTACIÓN DE LA FIBRA	DIRECCIÓN DEL ESFUERZO APLICADO	EFICIENCIA DEL REFUERZO
Fibras paralelas	Paralelo a las fibras	1
	Perpendicular a las fibras	0
Fibras al azar y uniformemente distribuidas dentro de un espacio específico en el plano	En alguna dirección del plano de las fibras	3/8
Fibras al azar y uniformemente distribuidas dentro de tres dimensiones del plano	Alguna dirección	1/5



Materiales compuestos laminares

Características

- Mejorar la resistencia a la corrosión
- Alta resistencia
- Resistencia superior al desgaste o la abrasión
- Expansión térmica poco usual
- Bajo costo. Bajo peso. Mejor apariencia

Regla de la mezcla

A partir de esta se puede determinar algunas propiedades de los materiales compuestos laminares, calculadas con error despreciable.

Propiedades como la resistencia a la corrosión y al desgaste, dependen principalmente de solo uno de los componentes del material compuesto, por lo que la regla de la mezcla no es aplicable.

Las propiedades en dirección paralela son:

$$\rho_{cl} = \sum(f_i \rho_i)$$

ρ_c = Densidad

$$\sigma_{cl} = \sum(f_i \sigma_i)$$

σ_c = Conductividad eléctrica

$$K_{cl} = \sum(f_i K_i)$$

K_c = Conductividad térmica

$$E_{cl} = \sum(f_i E_i)$$

E_c = Módulo de elasticidad

Las propiedades en dirección perpendicular a las lamillas son:

$$1/\sigma_{cpe} = \sum(f_i / \sigma_i)$$

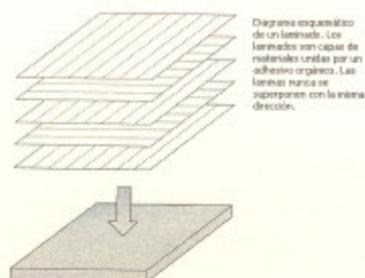
$1/\sigma_c$ = Conductividad eléctrica

$$1/K_{cpe} = \sum(f_i / K_i)$$

$1/K_c$ = Conductividad térmica

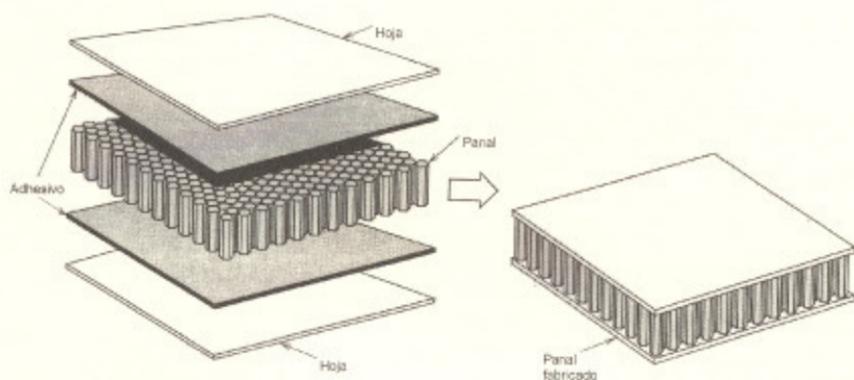
$$1/E_{cpe} = \sum(f_i / E_i)$$

$1/E_c$ = Módulo de elasticidad



APLICACIONES DE COMPUESTOS LAMINARES

Aplicaciones	Descripciones	Usos	Características
Laminados	Son capas de materiales unidos por un adhesivo orgánico	<ul style="list-style-type: none"> - Vidrios de seguridad, circuitos impresos - Aislamiento de motores - Elementos decorativos 	
Microlaminados	Compuesto formado por capas alternas de hojas de aluminio y de polímetro reforzado por fibra	<ul style="list-style-type: none"> - El Arall (laminado de aramida y Aluminio) - El Glade (laminado de vidrio y aluminio) 	Resistencia a la corrosión, a descargas eléctricas, maquinables, resistencia, rigidez
Metales Revestidos	Aleación Cu-80% Ni El Alcla: compuesto revestido de aluminio comercial puro con aleaciones de aluminio más resistentes	<ul style="list-style-type: none"> - Monedas de "plata" de EE.UU. - Construcción de Aeronaves. - Intercambiadores de calor. - Edificios y depósitos de almacenamiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia a la corrosión - Bajo peso. - Alta resistencia
Bimetálicos	Son dos tiras de metal unidas con distintos coeficientes de expansión térmica	<ul style="list-style-type: none"> - Pueden funcionar como interruptores y termostatos 	- Alta sensibilidad térmica
Capacitores multicapas	Compuestos laminares con capas alternas de un conductor y un aislante	Almacenamiento de energía	Alta conductividad eléctrica. Aislante en dirección



Panal constituido por celdas hexagonales unidas a hojas mediante capas adhesivas; produciendo estructuras ligeras, rígidas y resistentes.

Referencias

1. Anderson J.C., 2000, Ciencia de los Materiales, LIMUSA, Mexico.
2. Askeland Donald R., Phule Pradeep P., 2004, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Thomson, EE.UU.
3. Balevsky, Angel, 1988, Metaloznanie, DURJAVNO IZDATELSTVO TECHNICA, Bulgaria.
4. Buchkov D., 1980, Termichna Obrabotka na Metalite, Tekhnika, Bulgaria.
5. Callister jr. William D., 2003, Materials Science and Engineering an Introduction, John Wiley & Sons, Inc., EE.UU.
6. Jacobs James A., 2001, Experiments in Materials Science Engineering & Technology, Prentice Hall, EE.UU.
7. Kalpakjian Serope, 2001, Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Prentice Hall, EE.UU.
8. Kamburov K, 1999, Materialoznanie, Izdadelstvo Varna, Bulgaria.
9. Mangonon Pat L., 2001, Ciencia de Materiales: Selección y Diseño, Prentice Hall, México.

10. Rusena Elena, 2004, Rukovodstvo za Laboratorni Upraznenia, Color Print, Bulgaria.

11. Schakelford James F., 2005, Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros, Pearson Prentice Hall, España.

12. Van Vlack Lawrence H., 1999, Materiales para Ingeniería, CECSA, México.

Recibido: 13/09/05

Aprobado: 02/03/06