

9  
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y ELABORACION DE UN  
MATERIAL COMPUESTO

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N :  
ARTURO ARANDA FLORES  
LUIS A. CONDE ALVAREZ  
S E R G I O L O P E Z

DIRECTOR DE TESIS:  
UBALDO E. MARQUEZ AMADOR

MEXICO, D. F.

1992

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 1 Definición y Clasificación</b> .....	5
A Definición .....	5
B Clasificación .....	6
C Matriz, Reforzamiento e interfase .....	7
C.1 Matriz.....	7
C.2 Reforzamiento .....	12
C.3 Interfase .....	13
C.3.1 Teorías de adhesión .....	13
C.3.2 Tipos de uniones .....	17
D Razones por las que se manufacturan .....	22
E Propiedades y Aplicaciones .....	23
<b>Capítulo 2 Material reforzado con fibras</b> .....	28
A Definiciones.....	28
A.1 Fibra de vidrio .....	29
A.1.1 Fabricación .....	30
A.2 Fibra de Boro .....	33
A.2.1 Fabricación .....	34
A.3 Fibra de Grafito (Carbón) .....	38
A.3.1 Fabricación .....	38
A.4 Fibras Orgánicas (Kevlar) .....	42
A.4.1 Fabricación .....	43
A.5 Hilos metálicos .....	44
A.5.1 Fabricación .....	45
B Clasificación .....	48
a).- Fibras largas y orientadas .....	48
b).- Fibras largas y desorientadas .....	52
c).- Fibras cortas y orientadas .....	53
d).- Fibras cortas y desorientadas .....	55
B.1 Compuestos fibrosos y modos de fractura .....	58
B.2 Conducta por la resistencia promedio de las fibras .....	59

B.3 Acumulación estática de fibras fracturadas .....	60
B.4 Comportamiento y modos de fractura bajo compresión, cortante o carga de flexión .....	61
B.5 Extensión de grietas en compuestos fibrosos por combinación de tensiones, cortante y carga a la compresión .....	61
C Procesos de fabricación .....	62
C.1 Procesos en molde abierto .....	62
C.2 Procesos en molde cerrado .....	64
C.3 Métodos empleados para fabricar materiales compuestos de matriz metálica con fibras.....	65
D Aplicaciones .....	67
<b>Capítulo 3 Material reforzado con partículas .....</b>	<b>68</b>
A Teoría.....	68
1 Compuestos endurecidos por dispersión .....	69
1.1 Consideraciones en la selección del dispersante .....	71
2 Compuestos reforzados con partículas .....	72
2.1 Propiedades de los compuestos con partículas bajo carga .....	73
2.1.1 Compuestos con partículas en los cuales, los dispersores se deforman bajo carga .....	74
2.1.2 Compuestos con partículas en los cuales, la fase dispersa no se deforma bajo carga .....	76
3 Compuestos reforzados con hojuelas .....	80
3.1 Propiedades .....	84
B Procesos de manufactura .....	86
C Aplicaciones .....	89
<b>Capítulo 4 Material reforzado con láminas .....</b>	<b>95</b>
A Teoría.....	95
B Clasificación .....	96
B.1 Láminas unidireccionales .....	96
B.2 Propiedades elásticas de una lámina unidireccional .....	97
B.3 Laminados cruzados simétricos .....	100
B.4 Láminas equiangulares simétricas .....	102
C Procesos de manufactura .....	104
D Aplicaciones .....	108

<b>Capítulo 5 Otro tipo de reforzamiento</b> .....	110
<b>A Estructuras en forma de sandwich</b> .....	110
A.1 Materiales de las caras .....	111
A.2 Materiales del centro .....	112
A.2.1 Tipos de materiales centrales .....	113
A.2.1.1 Madera .....	113
A.2.1.2 Espuma .....	115
A.2.1.3 Panales .....	123
A.3 Materiales adhesivos .....	126
A.4 Diseñando un sandwich .....	129
A.4.1 Análisis estructural para casos específicos .....	131
A.4.2 Requisitos de diseño .....	132
A.4.3 Modos de falla .....	133
A.4.4 Pasos de diseño .....	134
A.5 Elaboración de estructuras sandwich .....	138
A.6 Elaboración del núcleo .....	140
<b>B Compuestos híbridos</b> .....	141
B.1 Fabricación .....	143
B.2 Selección de las fibras reforzantes .....	145
B.3 Propiedades .....	145
<b>Capítulo 6 Reforzamiento de polímero - cerámico</b> .....	148
<b>A Introducción</b> .....	148
A.1 Fibra de grafito base PAN .....	149
A.1.1 Proceso de conversión del PAN .....	149
A.1.2 Estructuras de las fibras de grafito base PAN .....	154
A.1.3 Propiedades mecánicas de las fibras de grafito base PAN .....	158
A.2 Resina epóxica .....	160
A.2.1 Resinas de alta temperatura .....	163
A.2.2 Resinas flexibles .....	164
A.2.3 Epoxies con retardo a la flama .....	164
A.2.4 Mecanismos y agentes de curado .....	165
A.2.5 Sistemas de resinas epóxicas curadas .....	167
A.2.6 Diluyentes reactivos y aditivos .....	168

A.2.7 Aplicaciones .....	168
A.3 Justificaciones de los constituyentes .....	169
B Procesos de manufactura de las probetas .....	172
B.1 Elaboración del material compuesto .....	175
B.2 Elaboración de la probeta de resina .....	177
C Ensayos .....	178
D Resultados .....	180
E Cálculos .....	184
F Análisis de resultados .....	186
Conclusiones .....	188
Bibliografía .....	192

# Introducción

La existencia de los materiales compuestos es tan antigua como el hombre mismo, ya que así se le puede considerar: como un material compuesto natural, de fibras laminares multidireccionales formado de huesos y tejido muscular.

El primer ejemplo, en términos de manufactura humana, lo encontramos en la cuna de la civilización: la cultura egipcia, en donde se encontró el uso de la madera chapeada en forma de un material ornamental.

Se puede decir que el concepto "reforzamiento con fibras" fué conocido y empleado en los tiempos antiguos, como por ejemplo, el uso de la paja en la fabricación de ladrillos realizada por los Israelitas en el año 800 A.C.; debido a que la paja es una fibra vegetal y proporciona un mejor rendimiento estructural, ayuda a la evaporación de la humedad del interior del cuarto y en caso de desquebrajamiento, ayuda a distribuirse en forma más uniforme

Otro de los descubrimientos, hacia el siglo XIII, fué realizado por los mongoles al utilizar materiales compuestos para el diseño de armas, como el arco. Su fabricación consistía en tendones de animales, madera, seda y adhesivos; más tarde, en la Edad Media, se generalizó el uso de "materiales laminados" en las espadas y armaduras.

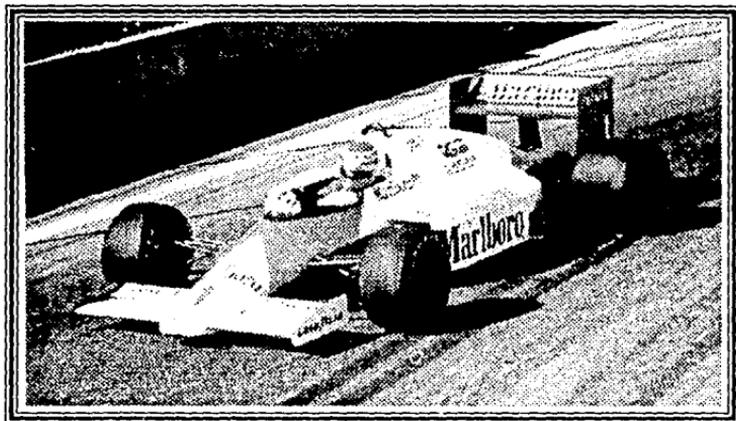
Los primeros materiales compuestos que se empezaron a llamar "modernos", son los empleados en la fabricación de aeroplanos a prueba de radar denominados "mosquitos" en el año de 1940.

Las estructuras de aeronaves muestran que pueden ser fabricadas con materiales compuestos en forma de "sandwich". De aquí que se mencione a la 2ª Guerra Mundial como referencia del nacimiento del compuesto poliéster-fibra de vidrio para la elaboración de domos o cúpulas y estructuras secundarias de naves aeroespaciales, tales como puertas y cubiertas, diseñadas y producidas en serie.

A partir de entonces, los compuestos de fibra de vidrio fueron reconocidos como materiales especiales válidos, cuando se seleccionan para la fabricación y producción del submarino caza-misiles Polaris.

Posteriormente, en los años 50, la tecnología de las fibras identifica la necesidad de encontrar aquellas que puedan competir en resistencia y dureza tal como el desarrollo dirigido a la elaboración de fibra de vidrio, tal como el tipo "S". Avanzando en los años 50, se buscaron materiales de bajo peso, fibras con gran resistencia y competitivas en un plano mercantil tales como el aluminio y el titanio. Dando como resultado de este esfuerzo (1963) las fibras de boro, seguidas por óxido de berilio y grafito.

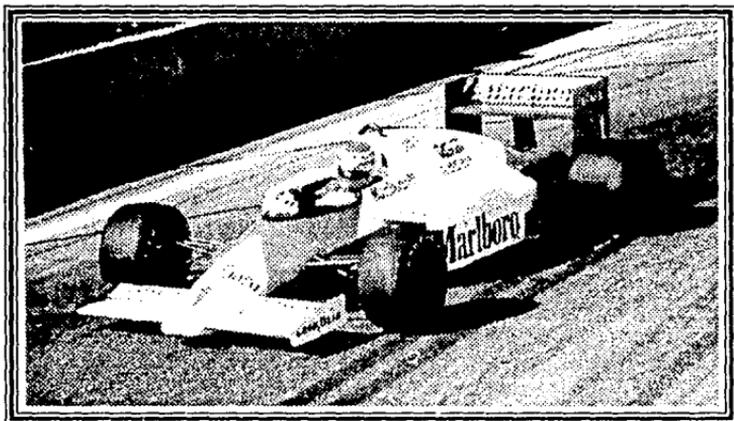
Así en el año de 1981, el automóvil de carreras Fórmula I, el McLaren MP4, hizo su debut presentando al mundo el motor de carreras de la era de los materiales compuestos. El chasis del auto fue hecho completamente de capas de paño de fibra de carbón impregnadas con resina, sustituyendo a los paneles comunes hechos de aluminio.



Ya en las 500 millas de Indianápolis en el año 1984 el chasis del auto de carreras March 84C consistía de un molde de una sola pieza de fibras de carbón en su sección superior remachada y pegada con resina epoxi a una sección inferior, compuesta de una estructura de aluminio en forma de panel, de la misma forma que la versión de 1985.

Se espera que dentro de la década de los 90, se logre que del 40% al 50% de las estructuras de los nuevos aviones, sean formadas de materiales compuestos de los llamados modernos. En la actualidad se están fabricando compuestos reforzados con fibras y son probadas en los ejes impulsores, motores, muelles y llantas de automóviles.

Lo anterior es un ejemplo de la considerable atención que han recibido los materiales compuestos en los últimos años, debido a las propiedades y características que presenta este grupo de materiales para ingeniería.



Ya en las 500 millas de Indianápolis en el año 1984 el chasis del auto de carreras March 84C consistía de un molde de una sola pieza de fibras de carbón en su sección superior remachada y pegada con resina epoxi a una sección inferior, compuesta de una estructura de aluminio en forma de panal, de la misma forma que la versión de 1985.

Se espera que dentro de la década de los 90, se logre que del 40% al 50% de las estructuras de los nuevos aviones, sean formadas de materiales compuestos de los llamados modernos. En la actualidad se están fabricando compuestos reforzados con fibras y son probadas en los ejes impulsores, motores, muelles y llantas de automóviles.

Lo anterior es un ejemplo de la considerable atención que han recibido los materiales compuestos en los últimos años, debido a las propiedades y características que presenta este grupo de materiales para ingeniería.

El presente trabajo tiene como principal característica el dar a conocer en una forma sencilla lo que son los materiales compuestos. Para ello hemos desglosado esta información de acuerdo a una clasificación hecha en base al material reforzante.

En el primer capítulo se define lo que es un material compuesto así como las razones por las que se manufacturan y algunas características generales. A partir del segundo capítulo se hablará de los diversos materiales compuestos, introduciéndonos brevemente en el tipo de reforzamiento que se manejará por capítulo. Para pasar posteriormente a la teoría de diseño y manufactura de éstos. En el sexto capítulo se muestra la elaboración de un material compuesto para aplicarlo específicamente en forma estructural. Este material compuesto podrá ser aplicado en carcazas de maquinaria, recipientes a presión, cascos de barcos, estructuras de antenas de comunicación y cuerpos de motores eléctricos.

Finalmente, se presentarán las conclusiones comparando los resultados de los ensayos y la teoría de diseño. Así como también, las limitaciones y sugerencias para la manufactura de este material experimental.

## Capítulo I

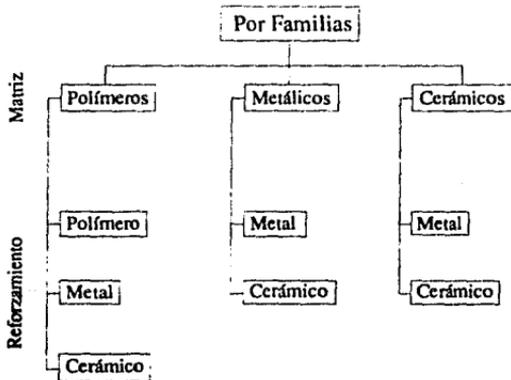
# Definición Y Clasificación.

### A. Definición.

Los materiales compuestos (llamados la 4ª familia de los materiales para la ingeniería) son los creados por el hombre. Esto significa que pueden estar constituidos por dos o más materiales, y que, aunque difieran en composición o forma, puede llevarse a cabo una combinación íntima entre ellos. La característica esencial es que cada material conservará su identidad, y al actuar en conjunto, mostrarán propiedades únicas en el compuesto, lo cuál no puede lograrse si se emplean en forma independiente.

Las propiedades que se obtienen dependen de los siguientes factores: la cantidad relativa de los componentes; la distribución, forma y orientación; y principalmente la integración, donde la interfase puede ser distinta a ellas.

**B. Clasificación.**



### C. Matriz, Reforzamiento e Interfase.

En los materiales compuestos se pueden distinguir las siguientes características: (1) la matriz, (2) el reforzamiento y (3) la interacción entre éstos, llamada interfase.

#### C.1) MATRIZ

Es el material base de un compuesto que rodea al reforzamiento, de esta manera, puede protegerlo tanto del medio ambiente, como de su manipulación.

Es considerada la parte *débil* del compuesto, ya que debe proporcionar ductilidad y tenacidad, además de proporcionar una estructura que transmita el esfuerzo en forma distribuida a las fibras, de manera tal, que las mantiene en forma correcta para soportar el máximo esfuerzo en virtud de sus características cohesivas y adhesivas, proveyendo resistencia a la propagación de las fracturas.

Cuando un haz de fibras sin una matriz circundante se somete a tracción, la ruptura de una de sus fibras la inutiliza para soportar cargas, y la tracción que estuviera soportando se transmite a las fibras intactas, acercándolas más a su límite de fractura. Si están inmersas en una matriz, la ruptura no acaba con la función mecánica de la fibra afectada. La razón de esto es que la matriz suele ser dúctil, ya sea elástica o plástica.

Cuando las fibras se separan, la deformación elástica de la matriz soporta esfuerzos de cizalladura que poco a poco crean tracciones en los fragmentos. La tracción de las fibras intactas de su entorno es menor que si no existiera matriz, por lo que el material compuesto es capaz de soportar mayores tracciones.

En términos de los criterios de selección, éstos se basan en su ductilidad y en su temperatura de trabajo. Cuando se trata de temperaturas no mayores de 200°C se puede utilizar un material polimérico. Tales materiales pueden ser termoestables cuando existan enlaces entre las cadenas del polímero que bloqueen la estructura molecular para dar lugar a una red tridimensional rígida que no se pueda fundir. Para un mejor comportamiento termoestable se utilizan resinas epóxicas.

Cuando se trata de obtener ductilidad y mejor resistencia a la temperatura se selecciona una matriz metálica; más este tipo de matriz conlleva dos problemas: su alta densidad comparada al polímero y su mayor complejidad en el proceso.

En las matrices cerámicas se obtienen mayores resistencias y rigidez pero no tenacidad como en el caso de la matriz metálica. Las grietas en el cerámico, al encontrarse con una fibra, pueden tomar un camino desviado o separar la fibra de la matriz; ambos procesos absorben energía, retrasando el avance de la grieta. Aún cuando la matriz esté plagada de grietas, tardará más en romperse.

#### C.1.1) Matrices para aplicaciones comerciales

La selección de la matriz para una aplicación comercial, dependerá de las propiedades para que el producto pueda soportar las condiciones normales de trabajo; estas propiedades y sus posibles aplicaciones, que varían en cada matriz, se mencionan a continuación:

##### C.1.1.1) Matrices Plásticas.

Los factores de diseño que se pueden utilizar para la elaboración de matrices en plásticos reforzados para una aplicación específica, se observan influenciados por las condiciones de: costo del material, elaboración, condiciones ambientales (por ejemplo: humedad y temperatura) en las que finalmente se van a utilizar; la resistencia ambiental y química de la matriz, la resistencia de diseño y el tiempo esperado de vida. Una consideración importante a las propiedades mecánicas del compuesto es qué tipo de resina o qué propiedades de la resina son requeridas para maximizar las propiedades mecánicas.

Las resinas poliéster y vinil éster son las más utilizadas en la industria, el comercio y el transporte. La diversidad de materiales resinosos, agentes curadores, llenadores y otros componentes proveen excelentes propiedades (ver Tabla 1.1), tales como resistencia química utilizando el silano como agente acoplador entre la fibra de vidrio en el poliéster y vinil éster, resistencia al calor y resistencia al medio ambiente.

### C.1.1.1.1) Tipos de resinas.

#### - Resina Epóxica

Las resinas epóxicas son aplicadas en las estructuras aeroespaciales, pues resultan una excelente combinación al proveer una variedad de características: ofrecen buenas propiedades mecánicas compuestas y resistencia al medio ambiente, además de flexibilidad de procesamiento y bajo costo. Sin embargo, son sensibles a la humedad en estado curado y sin curar, además, la absorción de humedad disminuye la temperatura de transición cristalina de la resina ( $T_g$ ).

Para evitar la sujeción a temperaturas iguales o mayores a  $T_g$ , su temperatura máxima de servicio es de  $130^\circ\text{C}$ .

#### - Resinas "Bismaleimide"

Tienen las mismas propiedades que las epóxicas, con la ventaja de soportar mayores temperaturas (hasta  $190^\circ\text{C}$ ). Sin embargo, son muy quebradizas y propensas a microrompimientos.

#### - Resinas Poliamídicas

Tienen una temperatura de servicio de  $260^\circ\text{C}$ . Son frágiles y poseen el problema de producir vapores volátiles que provocan vacíos en el compuesto.

Propiedad/Plástico	Poli(propileno)	Nylon 6.6	Poli-carbonato	Resina Epoxi	Resina Poliéster
Densidad ( $\text{mg m}^{-3}$ )	0.90	1.14	1.06-1.2	1.1-1.4	1.2-1.5
Módulo de Young ( $\text{GN m}^{-2}$ )	1.0-1.4	1.4-2.8	2.2-2.4	3-6	2-4.5
Número de Poisson	0.3	0.3	0.3	0.38-0.4	0.37-0.39
Resistencia a la Tensión ( $\text{MN m}^{-2}$ )	25-38	60-75	45-70	35-100	40-90
Resistencia a la Compresión ( $\text{MN m}^{-2}$ )	—	—	100-200	90-250	—
Elongación a Ruptura (tenido) (%)	>300	40-80	50-100	1-6	2
Conductividad Térmica ( $\text{Wm}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
Coefficiente de Expansión Térmica ( $10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	110	90	70	60	100-200
Punto de Fusión ( $^\circ\text{C}$ )	175	264	—	—	—
Temperatura de Deformación bajo carga a $1.82\text{ MN m}^{-2}$	60-65	75	110-140	—	—
Temperatura de Deformación (Calentamiento) ( $^\circ\text{C}$ )	—	—	—	50-300	50-110
Desmenución en Curado (%)	—	—	—	1-2	4-8
Absorción de Agua durante 24 Hrs a $20^\circ\text{C}$ (%)	0.09	1.3	0.1	0.1-0.4	0.1-0.3

TABLA 1.1 Propiedades de algunos materiales plásticos empleados como matriz

### C.1.2) Matrices Metálicas

Al igual que en los materiales compuestos con matriz plástica, se consideran factores de diseño en compuestos de matriz metálica, los cuales son: bajo peso, conductividad eléctrica, conductividad térmica, altos módulos, buena resistencia, su elaboración, costo y altos puntos de fusión. Ver tabla 1.2.

- Aluminio: Se prefiere por ser más ligero y de manufactura sencilla.

- Titanio: Es un material ligero y resiste mayores temperaturas que el aluminio. Sus desventajas son: la de ser muy costoso, su uso es especializado y posee reacciones químicas con otros reforzamientos.

- Magnesio: Más ligero que el aluminio, tiene la ventaja de poder mojar más fácilmente al reforzamiento. Al agregar alúmina mejora su resistencia.

- Cobre: Es excelente conductor de calor y electricidad. Más resistente que el aluminio a temperaturas superiores a los 371°C. Más pesado que el aluminio y con menores problemas de manufactura de compuestos que el titanio.

CARACTERÍSTICA/ELEMENTO	Aluminio	Cobre	Magnesio	Titanio A-70
SÍMBOLO	Al	Cu	Mg	Ti
NÚMERO ATÓMICO	13	29	12	22
PESO ATÓMICO [Kg/gmol]	26.98	63.54	24.32	47.9
PESO ESPECÍFICO [Kg/dm <sup>3</sup> ]	2.699	8.96	1.74	4.54
COMPOSICIÓN % DEL PESO	99.45 min	99.94	—	99.4
CONDICIONES	RECOCIDO	RECOCIDO	—	RECOCIDO
MÓDULO DE YOUNG 10 <sup>11</sup> [Pa]	6.895	11.72	4.482	10.69
RESISTENCIA A LA TENSIÓN 10 <sup>7</sup> [Pa]	8.274	22.06-24.13	—	55.16-723.9
RESISTENCIA AL ESFUERZO DE DEFORMACIÓN PERMANENTE 10 <sup>7</sup> [Pa]	2.758	6.895-7.564	—	48.26-65.3
COCIENTE LINEAL DE EXPANSIÓN TÉRMICA POR °CX10 <sup>-6</sup>	24	17	23	9
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m K]	221.9	393.48	158	0.172
GRAVEDAD ESPECÍFICA	2.70	8.86	—	4.54
PUNTO DE FUSIÓN (°C)	646-657	1083	650	1670

TABLA 1.2 Propiedades de algunos metales utilizados como matrices

### C.1.3) Matrices Cerámicas

Los materiales cerámicos, a diferencia de los metálicos, no se pueden forjar o maquinar en forma de barras o láminas; por lo que se debe trabajar la materia prima, pensarla para darle forma y, luego, desarrollar la estructura en la forma deseada calentándola. Comúnmente los cerámicos son duros, frágiles, con alto punto de fusión y bajas conductividades térmicas y eléctricas; adecuadas estabilidades térmicas y químicas y una gran resistencia a la compresión.

Los materiales cerámicos tienen una gran variedad de aplicaciones que van desde la alfarería, fabricación de ladrillos, tubos, refractarios y artículos para la industria eléctrica.

- **Concreto:** Es un material común de construcción. Está compuesto de agregado, cemento y agua. El agregado, formado de grava y arena, está unido por una reacción de cementación entre los minerales en el cemento Portland y el agua. Se pueden controlar las cantidades relativas de minerales en el cemento así como la velocidad de secado y controlar, de esta manera, la resistencia final. El concreto reforzado se aplica en cimbrias, tuberías de alcantarillado, tejas, muros y entrepaños para muros de construcción.

- **Alúmina:** Es un abrasivo y refractario importante. Se emplea extensamente como materia prima en las mezclas cerámicas y también en estado puro. Debido a su alto punto de fusión, la alúmina se emplea como refractario para ladrillos, tubos y crisoles. Para usos ópticos como en el caso del láser de rubí y, más recientemente, en tubos para lámparas de iluminación con vapor de sodio.

- **Vidrio:** Es un producto inorgánico de fusión que se ha enfriado hasta un estado rígido sin que haya cristalización. El vidrio fundido tiene la ventaja de que se puede trabajar en muchas formas y de enfriarse a la temperatura ambiente. Es un material rígido a temperaturas normales; pero se puede volver a fundir y moldear cualquier número de veces mediante la aplicación de calor. Las aplicaciones son extensas, algunas de ellas, como el borosilicato, que soporta altas temperaturas, es usado en el laboratorio y utensilios de cocina; el vidrio inastillable, utilizado en parabrisas y en ventanillas de cajeros de banco;

el templeado, que tiene la capacidad de soportar fuerzas de tracción y el alambrado, resistente a choques de calor y, por tanto, a prueba de incendio.

En la tabla 1.3 se muestran algunas propiedades de tres materiales cerámicos.

	CONCRETO	ALUMINA	VIDRIO
Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	2.309.00	3.970.00	2.595.00
Punto de Fusión [°C]	—	2.032.00	1.430.00
Módulo de Elasticidad [Pa x 10 <sup>9</sup> ]	—	365.42	de 4 a 14
Módulo de Ruptura [Pa x 10 <sup>6</sup> ]	4.482	689.5	—
Conductividad térmica [W/mK]	0.078	30.288	0.67 a 1.21
Resistencia a la compresión [Pa]	27.58x10 <sup>6</sup>	—	—

TABLA 1.3 Materiales Cerámicos

## C.2) REFORZAMIENTO

Su principal característica es la de soportar la carga aplicada sobre el material ya que le da fuerza y dureza. En el caso de las fibras, la carga se distribuye a otras fibras cuando una de ellas falla, evitando así la inutilidad del material.

Los principales tipos de reforzamiento que podemos encontrar en un material compuesto tienen por lo general tres formas (fig. 1.1): partículas, fibras y láminas.

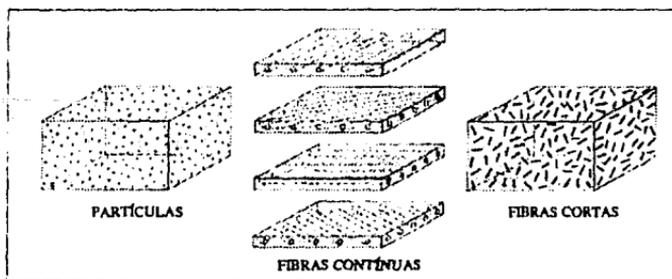


FIG.1.1 Tipos de reforzamientos

### C.3) INTERFASE

La interfase comunica la fuerza que actúa en la matriz al reforzamiento a través de ella.

En el análisis para su estudio se deben considerar las siguientes suposiciones para las propiedades de la interfase:

- a) La matriz y la fibra se comportan como materiales elásticos.
- b) La interfase es infinitesimalmente delgada.
- c) La unión entre la fibra y la matriz es perfecta, lo que implica que no haya esfuerzos discontinuos a través de toda la interfase.
- d) El material junto a la fibra tiene las mismas propiedades que el material restante.
- e) Las fibras están dispuestas en forma regular o en un arreglo repetitivo.

La interfase es un factor dominante en las propiedades de la resistencia a la fractura y a su respuesta al medio acuoso y corrosivo. Materiales compuestos con una débil interfase tienen relativamente baja resistencia y dureza, pero alta tenacidad a la fractura. Mientras que los materiales con una fuerte interfase poseen alta resistencia y dureza pero son muy frágiles. El efecto es debido a la simple desunión y rompimiento de las fibras de la matriz durante la propagación de la fractura.

#### C.3.1) Teorías de adhesión

En un sistema simple, la unión de la interfase se debe a la adhesión entre la fibra y la matriz. No obstante, es frecuente la necesidad de cubrir con una capa de adhesivo a los elementos del material formando una unión en el compuesto.

La adhesión puede ser obtenida principalmente por cinco mecanismos que pueden ocurrir en forma separada o en combinación para producir la unión.

a) **Absorción y Mojado.** Cuando dos superficies eléctricamente neutras son colocadas lo suficientemente cerca, se produce una atracción física. Este fenómeno es mejor entendido si consideramos al mojado de superficies sólidas por líquidos. En el caso de dos sólidos, el mojado existe cuando se junta la superficie rugosa en un nivel micro, o bien, cuando, a un nivel atómico, el contacto sólo se realiza en algunos puntos (fig 1.2).

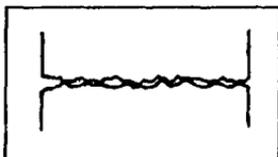


FIG. 1.2 Mojado entre sólidos

En las superficies que se encuentran contaminadas, aún si la contaminación es removida y ocurre una fuerte unión en los puntos de contacto, el promedio de adhesión en toda la superficie será débil. Para un efectivo mojado sobre la superficie de la fibra, la resina líquida debe cubrir cada cresta y valle de la superficie desplazando así el aire. Las capas límites débiles deben ser evitadas.

El mojado puede ser entendido por la siguiente ecuación:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}$$

(Dubre)

$W_a$  : Adhesión

$\gamma_1, \gamma_2$  : Energía libre

Superficial,

líquido y gas

En el caso de un líquido sobre una superficie (fig. 1.3), cuando las fuerzas del punto A se resuelven sobre la horizontal, la ecuación de Young es:

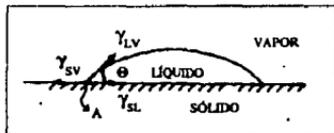


FIG. 1.3 Mojado entre un líquido y un sólido

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta$$

$\gamma$ : Energía superficial

s: sólido

l: líquido

v: vapor

El mojado espontáneo ocurre a  $\theta = 0^\circ$ . La tensión superficial de los sólidos es difícil de determinar a comparación de los líquidos en los que puede determinarse con relativa facilidad. El valor de  $\gamma_{sv}$  puede ser obtenido de la forma como el líquido moja el sólido  $\gamma_{lv}$ . Zisman introduce el concepto de la tensión superficial crítica de mojado ( $\gamma_c$ ), donde sólidos son mojados por líquidos en forma espontánea cuando  $\gamma_{lv} < \gamma_c$ . Parámetro importante para considerar el mojado de la resina sobre las fibras.  $W_a$  puede ser obtenida por:

$$W_a = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} - \gamma_{sl}$$

$W_a$  representa la unión física resultante de fuerzas altamente localizadas entre moléculas, que en el caso ideal da una fuerte adhesión. Las causas que provocan una débil unión son: (a) La superficie de la fibra está contaminada, (b) Hay aire atrapado, (c) Debido a la menor cantidad que sujeta durante el proceso de curado, lo cual conduce a un desplazamiento de la superficie, lo que no puede ser evitado.

b) **Interdifusión.** Es posible formar una unión entre la superficie de dos polímeros por difusión de moléculas de un polímero a la red molecular de la otra superficie (fig. 1.4). La resistencia de la unión dependerá del enredo molecular total y el número de moléculas involucradas. La interdifusión puede ser provocada por la presencia de solventes, de agentes plastificantes, y la cantidad de difusión dependerá de la conformación molecular así como de los constituyentes involucrados y la facilidad del movimiento molecular. La interdifusión puede facilitarse, en parte, cuando las fibras son precubiertas con polímero antes de incorporarlas dentro de la matriz. El fenómeno de interdifusión ha sido llamado "autoadhesión" en relación a los adhesivos.



FIG. 1.4 Interdifusión molecular

c) **Atracción electrostática.** Las fuerzas de atracción ocurren entre dos superficies cuando una transporta una carga positiva y la otra una carga negativa (fig. 1.5a), como en el caso de una interacción base-ácida y unión iónica. La resistencia de la interfase dependerá de la densidad de carga. No obstante, la atracción electrostática es insuficiente para hacer una mayor contribución a la fuerza necesaria de unión entre fibra-matriz, esto bien puede tener un papel importante en la manera en que los agentes acopladores son depositados en la superficie de fibras de vidrio. También la superficie puede mostrar propiedades catiónicas o aniónicas, dependiendo de los óxidos en el vidrio y el Ph de la solución acuosa usada para aplicar los agentes acopladores Silanos<sup>1</sup>.

De este modo, si los silanos iónicos son usados, se espera que los grupos catiónicos y aniónicos se atraigan (fig. 1.5b). Esto muestra que si se controla el Ph, las moléculas del silano son orientadas en la superficie del vidrio para obtener un efecto de acoplamiento óptimo, lo cual ciertamente involucra algunas uniones químicas, ya que sólo la atracción electrostática no sería resistente, por sí misma, al agua.

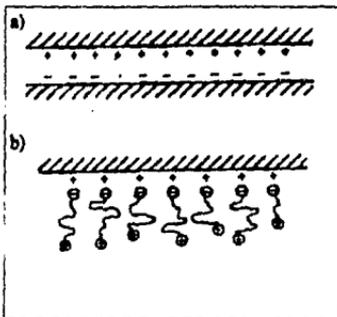


FIG. 1.5 a) Atracción electrostática  
b) Uniones aniónicas-catiónicas

d) **Unión química.** Es de interés particular en el caso de los materiales compuestos por fibras, porque éstas ofrecen la principal explicación para el uso de agentes acopladores en la fibra de vidrio y la fuerza de unión en fibras de carbón y matriz polímera. Una unión química es formada entre un

1) Disponible en vinilo, cloroalkil, epoxi, metacrilato y amina.

agrupamiento químico en la superficie de la fibra y un grupo químicamente compatible en la matriz (fig. 1.6). La fuerza de unión depende del número y tipo de uniones, y la falla en interfase debe involucrar uniones rotas. El proceso de la formación de la unión y rompimiento son, de alguna manera, activadas dinámicamente en equilibrio térmico.

e) **Adhesión mecánica.** Algunas uniones pueden ocurrir por el entrelazado de dos superficies (fig. 1.7). Una resina, que moja la superficie de la fibra, sigue

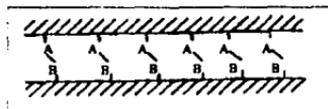


FIG. 1.6 Enlaces químicos A-B

cada detalle de esta superficie. La fuerza de interfase a tracción es indeseable por ser alta, a menos que haya gran número de ángulos re-entrantes en la superficie de la fibra. La resistencia compartida puede ser significativa y depende del grado de rugosidad. Un factor que está también relacionado a la rugosidad de la superficie de la fibra es el potencial para un incremento completo de la fuerza de unión, por ejemplo, unión química debida al área superficial que está disponible, donde los simples aspectos geométricos de adhesión mecánica poseen muchos esfuerzos internos en un material compuesto, y que se logran durante la resistencia aparente de la unión fibra-matriz. Así, por ejemplo, la disminución de la resina durante el curado del polímero termoestable y una diferencial a la expansión térmica de la matriz y las fibras pueden producir tensiones, compresiones y esfuerzos cortantes en la interfase, dependiendo de la geometría de las fibras y el compuesto.

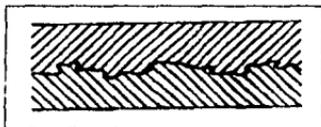


FIG. 1.7 Unión mecánica

### C.3.2) Tipos de uniones

Los principales tipos de unión que pueden ser empleados en los materiales compuestos se dividen en dos tipos: adhesivos y mecánicos.

a) Adhesivos.

1. **Epóxicas.** El sistema adherente comprende una resina y un endurecedor, aditivos y una operación de endurecimiento. Las epóxicas de un componente requieren un endurecimiento a temperatura elevada; las de dos componentes se realizan a temperatura ambiente.
2. **Cianoacrilatos.** Son monómeros líquidos que se polimerizan cuando se extienden, formando una película entre dos superficies, dando así un sistema de un componente que se endurece a temperatura ambiente.
3. **Anaeróbicas.** Son compuestos acrílicos poliéstericos de un solo componente que se endurecen a temperatura ambiente y permanecen líquidos cuando se exponen al aire, pero se endurecen rápidamente cuando les falta oxígeno. Los anaeróbicos modificados con caucho eliminan el olor, la inflamabilidad y la toxicidad, a la vez que aceleran la operación de endurecimiento.
4. **Resinas acrílicas.** En la mayoría de estos casos, a las superficies a unir se les aplica primero una capa catalizadora y cuando se les aplica al adhesivo, actúa como un anaerobio endureciéndose y formando, a temperatura ambiente, una fuerte unión termoendurecida, y con mayor rapidez si se aplica calor.
5. **Ureánicos o poliuretanos.** Existen sistemas tanto termoplásticos como termofijos.
6. **Siliconas.** En general, se emplean por su alta viscosidad. Son sustancias que pueden formar uniones estructurales de baja resistencia mecánica.
7. **Adhesivos refractarios.** Cuando debe conservarse la resistencia mecánica a temperaturas superiores a los 250°C, se emplean adhesivos estructurales tales como resinas fenólicas, epóxicas, siliconas o resinas fenólicas modificadas, poliamidas o productos cerámicos.

8. **Pegamentos a altas temperaturas.** Estas sustancias se emplean para transmitir cargas entre piezas. Son sustancias termoplásticas sólidas a temperatura ambiente, pero que se transforman en líquidas cuando se calientan.

La unión con adhesivos se clasifica en continuas y discontinuas. En las continuas, las dos superficies en contacto para pegarse son relativamente extensas y de las mismas dimensiones. En las discontinuas, una de las superficies adherente es pequeña en comparación con la otra.

Una unión adhesiva puede estar sometida a tracción, constante, de despegue o de desgarre (fig. 1.8); donde la unión de los adhesivos es muy débil en las dos últimas por lo que es importante que se diseñen para que el esfuerzo sea de tracción o cortante, así toda la superficie adhesiva compartirá la carga por igual.



FIG. 1.8 Tensiones posibles sobre una unión con adhesivo

#### a.1) Preparación.

1. Limpieza, eliminación de contaminantes y grasas.
2. Ataque químico, debe ser químicamente receptiva a la impregnación, ofreciendo óptimas características humectantes.
3. Enjuague.
4. Secado.

a.2) Ventajas.

- Permiten unir casi todos los materiales y combinaciones de éstos.
- Bajas temperaturas de endurecimiento.
- Buena resistencia.
- Mediante una unión es posible obtener una distribución de cargas e incrementar la resistencia a la fatiga.
- Puede ofrecer aislamiento térmico y eléctrico, amortiguar vibraciones y proteger de efectos galvánicos entre metales disímiles.
- Económico.
- Simplifica el sistema de mecanizado y ensamblado, desaparición de elementos de unión mecánica.
- Técnicas que no requieren mano de obra calificada.

a.3) Desventajas.

- La mayoría no es estable a temperaturas mayores de 180°C.
- Resulta difícil determinar la calidad de una unión adhesiva por medios no destructivos.
- La preparación de las superficies y adhesivos son cruciales para una buena unión.
- La duración no es predecible.
- El proceso suele durar más que otras alternativas.
- Algunos adhesivos contienen compuestos que son molestos.

b) Uniones Mecánicas.

Por unión integrada se entiende la existencia de porciones conformadas del componente que se enclavan o interfieren con otras porciones del mismo conjunto, y por lo común, se emplean productos de chapeado, por ejemplo: orejeras, pestañas, salientes, engatillados y ondulaciones.

Los elementos de fijación son piezas separadas, cuya misión primordial es unir componentes, y entre ellos aparecen elementos tales como pernos, tornillos, tuercas, entre otros.

Los ajustes por contracción y por expansión, en este caso, en una o en ambas piezas se introduce una variación dimensional (calentando solo una pieza, calentando una y enfriando la otra, o enfriando una); se ensamblan y se establece así un fuerte ajuste por interferencia cuando se recupera la uniformidad de temperatura.

En los ajustes forzados se consiguen esencialmente los mismos resultados, pero la unión se establece por medios mecánicos y no por diferencia de temperaturas.

b.1) Inconvenientes.

- Las uniones mecánicas se convierten en un punto vulnerable a falla por:
  - (1) El diseño de la unión y la técnica empleada para construirla.
  - (2) Los materiales empleados.
  - (3) La construcción de la unión.
  - (4) Los medios y detalles de instalación.
- Las uniones pueden adolecer de resistencias mecánicas insuficientes y a la corrosión.
- Los elementos de fijación pueden quedar precargados en exceso.
- Aflojamiento por vibración y fatiga.

Al diseñar un elemento de fijación, deben especificarse radios entre la cabeza y el cuerpo, roscas laminadas y revestimientos anticorrosivos. Evitar descentramientos y orificios sobredimensionados, garantizando un buen apriete.

Hasta mediados de 1940, cuando un diseñador deseaba unir materiales metálicos, la selección de la unión por lo general involucraba el uso de pemos, tornillos, remaches y pasadores; o un método de unión térmica, tal como la soldadura, el bronceado o soldado. Actualmente el diseñador puede seleccionar también adhesivos como una técnica alterna para reparar rupturas o unir componentes. A las uniones térmicas y los adhesivos se les considera como uniones permanentes, mientras que los tornillos, pemos, tuercas y pasadores son elementos de unión que nos permiten desensamblar.

Las aplicaciones de los adhesivos se pueden ver en las construcciones en donde se sustituyen clavos por betún adhesivo para unir triplay o entablar partículas para entarimizar vigas y panales, así como para paredes de adorno, o el uso de elastómeros para unir pedazos de forro rígido a concreto.

Otro campo de aplicación de los adhesivos es el de la industria aeroespacial, en donde se unen láminas delgadas de aluminio, plástico o compuestos para estructuras, y mantenerlo con firmeza. En este campo se buscan las ventajas del peso ligero, resistencia a la fatiga y la fuerza uniforme. Para el lanzamiento del vehículo espacial se emplea un sistema de unión adhesiva para las tejas cerámicas, diseñadas para soportar temperaturas superiores a los 1260°C.

#### **D: Razones por las que se manufacturan.**

Estos materiales se seleccionan y diseñan de forma que se logran a un bajo costo y peso, propiedades prefijadas (o establecidas) tales como:

- a) Aumento en la rigidez específica o estabilidad dimensional (*fibra de vidrio, boro en termoplásticos*).
- b) Aumento de la tenacidad (*fibra Kevlar*).
- c) Aumento de la temperatura de deflexión (*fibra de vidrio*).
- d) Aumento de la dureza superficial (resistencia al desgaste). (*Plástico sobre metal, boro aluminio*).
- e) Reducción de costos (*aserrín en plásticos, grafito en resina*).
- f) Reducción de permeabilidad de gases y líquidos (*tetrapak*).
- g) Modificación de las propiedades eléctricas (*plástico fibra de vidrio, grafito plomo, grafito cobre*).
- h) Disminución de la absorción del agua (*plásticos sobre madera*).
- i) Disminución de la expansión térmica (*cerámicos en metales*).
- j) Aumento de la resistencia a la oxidación y corrosión (*metales con porcelana*).
- k) Características ópticas y de conductividad (*superconductores*). (*Cobre con grafito, Kevlar en resina, aluminio con aluminio*).

Los materiales compuestos actuales y del futuro próximo deberán ser diseñados para ser fuertes, ligeros, rígidos y más resistentes que los materiales naturales, o para poseer propiedades requeridas por la nueva tecnología, características que no pueden, o podrán, encontrarse en materiales simples.

### E. Propiedades y Aplicaciones

#### E.1) Industria aeroespacial y aeronáutica.

Una evaluación gubernamental con respecto a los avances de la tecnología de los materiales compuestos (1972) concluye que dos de las barreras principales, costo y confianza, necesitan ser conquistadas. Con esta base, se han destinado esfuerzos dirigidos hacia el logro de métodos de fácil fabricación que permitan reducir los costos en el diseño y en el material empleado.

Por otro lado, se ha logrado obtener la confianza pública sobre los materiales compuestos en la industria aeroespacial y de aeronaves basados en los resultados de extensas pruebas en servicios y evaluaciones de materiales. Una aplicación directa en este campo es la sustitución de los metales por materiales compuestos (fig. 1.9).

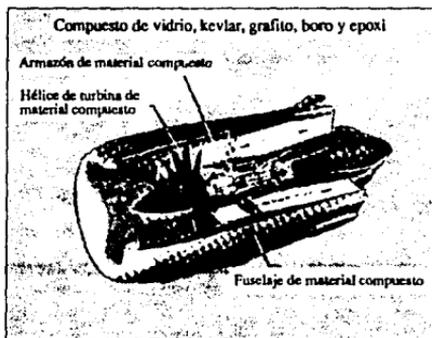


FIG. 1.9 Motor QCSEE UTW

Otro ejemplo, lo encontramos en los aviones de la serie X-15 (1958 a 1968), pioneros del vuelo hipersónico, operando cerca de la periferia espacial a Mach 6, alcanzando temperaturas de  $650^{\circ}\text{C}$  en la superficie del fuselaje. El X-15 solo se sometió a  $500^{\circ}\text{C}$ . Su estructura

fué hecha de acero y titanio; el cuerpo se recubrió con INCONEL X, una aleación acero-níquel que dá una gran fuerza y resistencia al calor.

En el caso del transbordador espacial, tenemos que fué diseñado para reingresar a la atmósfera de la tierra a Mach 25, alcanzando así temperaturas superiores a los 1250°C (en algunos puntos el rango de temperaturas va de -110°C a 1648°C), por lo que fué necesario cubrirlo con protectores térmicos, cerámicos en forma de tejas. Las tejas son un compuesto de elementos básicos de fibra sílica derivada de arena común y una solución de enlace de sílica coloidal, cubierto con 15,000 tejas de sílica. Las tejas en la cara superior del transbordador reciben una capa compuesta de sílica blanca y óxido de alúmina brillante para reflejar los rayos del sol, mientras que está en órbita, resistiendo temperaturas de 315°C a 1185°C. Las tejas internas reciben una capa de vidrio borosilicato negro en reacción cruda, para que resistan temperaturas arriba de 1260°C. Las tejas exteriores son tratadas con un polímero impermeable para ayudar a eliminar la absorción del agua. El espesor de las tejas tiene un promedio de 5mm a 125mm.

Las especificaciones de diseño requieren que estas tejas resistan el calentamiento y el enfriamiento repetido, el alto grado de ruido (165 db al lanzamiento) y a choques térmicos. Otra propiedad es que disipan tan rápidamente el calor, que pueden ser sostenidas en la mano segundos después de salir del horno. En suma, se prefieren debido a su bajo peso, baja expansión y conducción térmica y a su estabilidad a altas temperaturas.

Otro compuesto utilizado es el reforzamiento carbón- carbón (RCC), tratado térmicamente y unido con carburo de silicio. Es usado en la proa y orillas delanteras del ala para proteger éstas áreas hipercalientes.

El NOMEX (un compuesto de nylon en forma de lámina) es usado solamente para proteger algunas áreas tales como columnas de puertas de carga, soportando temperaturas de 680°C. Estas puertas son hechas de grafito-epóxico (fig 1.10).

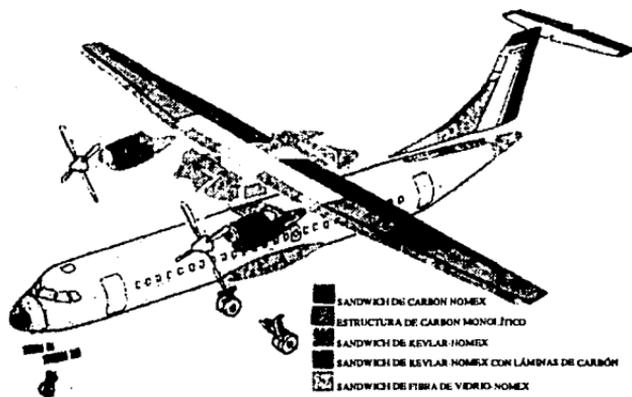


FIG. 1.10 Aplicación del Nomex en la estructura de un avión

#### E.2) Industria automotriz y transporte.

La industria automotriz se encuentra actualmente comprometida, activamente, en la experimentación dentro del uso de compuestos. La Ford Motor Co. empezó en 1941 con la fibra de vidrio reforzando plásticos para el portaequipajes y ahora son usados extensamente en carros y camiones para el frente, panales, guardafangos, cubiertas y cabinas de camiones.

Otros compuestos se han usado para el disco de frenado del pistón, cajas para baterías, cápsulas para filtro de aceite y columnas de volante de una sola pieza. Por otro lado, en los carros de la GMC, la producción de fibra de vidrio en una matriz de nylon representa una economía del 50% en peso sobre las partes metálicas.

La sustitución de partes robustas por materiales ligeros fué realizada con el objeto de disminuir peso y ahorrar combustible (fig 1.11). La Ford Motor Co. utilizó, en 1980, materiales híbridos para las aletas de un compresor que contiene 50% de vidrio y 20% de fibras continuas de grafito en una matriz de resina poliéster. En 1981, el Corvette, utilizó un compuesto de hojas elásticas transversales de resina epóxica con fibra de vidrio de 3.6 Kg en comparación de la multicapa de acero de 20.5 Kg.

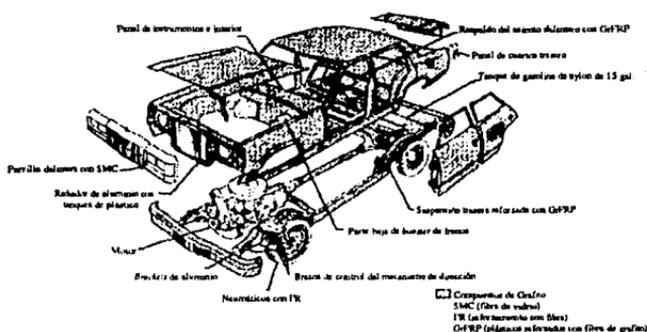


FIG. 1.11 Vehículo elaborado con materiales compuestos

En términos de la aplicación en el área de la conjunción, se reemplaza un ensamble conteniendo diferentes partes por uno de una pieza sencilla, con lo que se ahorra en piezas de sujeción y barrenos necesarios para unirlos. El tiempo y el trabajo empleado se reducen y, por lo consiguiente, el costo es menor.

Finalmente, los materiales compuestos son eficientemente energéticos, es decir, se requiere menor energía para producir partes plásticas que metálicas. Estos desarrollos en la aplicación de materiales compuestos representan los recientes esfuerzos para conservar realmente los recursos energéticos disponibles. Tales esfuerzos se subrayan con el

conocimiento de que la energía requerida, por Kilogramo de material, es cuando mucho la mitad para el aluminio y el acero. Además, la industria del hierro y el acero son las únicas grandes consumidoras de energía (11% de consumo total).

### E.3) Industria recreacional (Entretenimiento).

Los materiales compuestos han entrado a la industria deportiva. Los compuestos se utilizan en estructuras tales como cubiertas de barcos, arcos, palos de golf, cañas de pescar, esquís, bicicletas y raquetas de tenis (fig 1.12).

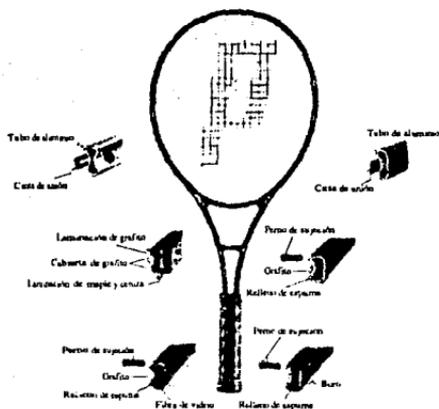


FIG. 1.12 Utilización de materiales compuestos en una raqueta de tenis

# Material Reforzado Por Fibras

### A. Definiciones.

Un material compuesto reforzado con fibras, es un sistema primario hecho de diversos acomodamientos de algunos reforzamientos particulares de fibras, inmersas en un material de protección llamado matriz. En estos casos, se presenta un agente de enlace aplicado a la fibra para mejorar la adhesión entre la fibra y la matriz.

Estos materiales emplean las fibras como el elemento principal que acarrea la carga en el compuesto. En tanto que la matriz tiene como función importante la de transferir la carga a las fibras para ser aprovechadas eficientemente, de manera tal, que la resistencia total de la fibra pueda desarrollarse.

**Fibra:** Es un filamento básico de material bruto con el cual se elaboran hilos, paños o telas. Siendo las fibras más antiguas elaboradas a partir del yute, cáñamo, lino, algodón y de algunas especies animales. Actualmente las fibras pueden ser *ORGANICAS* (plantas, animales y minerales), *SINETICAS* (hechas por el hombre, de un material polímero o cerámico), o *METALICAS*. La "ASTM" (American Society Testing of Material) define "que una fibra sera aquella que tiene una longitud de por lo menos 100 veces su diámetro y un diámetro mínimo de 5 micras".

Las cinco principales fibras que se utilizan como reforzamiento son las siguientes:

#### A.1) FIBRA DE VIDRIO

Estos son minerales amorfos, formado principalmente de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) con adiciones de óxidos de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio. (Tabla 2.1).

	Vidrio E	Vidrio C	Vidrio S
$\text{SiO}_2$	52.4	64.4	64.4
$\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	—
MgO	4.6	3.3	10.3
$\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$	0.8	9.6	0.3
$\text{Ba}_2\text{O}_3$	10.6	4.7	—
$\text{B}_2\text{O}_3$	—	0.9	—

Tabla 2.1 Composición química de vidrios comerciales

**Vidrio tipo "E"** (E por eléctrico). Vidrio compuesto por borosilicato de calcio y aluminio. Es el primer Vidrio desarrollado para ser usado en fibras. Preferido por su buena resistencia, bajo peso (aproximadamente la mitad de un alambre de acero), buena resistencia a la fatiga, excelentes propiedades eléctricas y resistencia al desgaste; siendo el grado estándar de resistencia a la tensión de 3.5 GPa.

**Vidrio tipo "C"** (C por corrosión). Este tipo de vidrio es más costoso. Aunque posee una alta resistencia a la corrosión, tiene baja resistencia mecánica.

**Vidrio tipo "S"** (vidrio de silicato de calcio y sodio). Es el más costoso de los vidrios. Tiene un alto módulo de Young y alta resistencia a la temperatura, pudiéndose exceder el esfuerzo a compresión un 25% y el esfuerzo de tensión en un 40%. El módulo de Young es 20% mayor y la densidad 4% menor en comparación con el tipo "E". Por esta razón solo se aplica a la industria aeroespacial.

### A.1.1) Fabricación

Comercialmente, las fibras de vidrio son producidas por moldeado y exudado del vidrio a través de un orificio usualmente de 0.79 a 3.18 micras de diámetro, y en seguida se estiran para lograr un diámetro fino de 0.36 a  $1.9 \times 10^{-2}$  mm. Las fibras de vidrio continuas, usadas en reforzamientos de alta resistencia son estiradas por un devanador mecánico operando a velocidades arriba de las 7,000 rpm (figura 2.1).

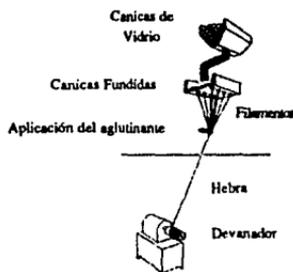


Fig 2.1 Representación esquemática de la elaboración de fibras de vidrio

La materia prima es depositada en un recipiente de platino, donde es sometida a elevadas temperaturas ( $1200^{\circ}\text{C}$ ) hasta obtener vidrio en estado de fundición. Los orificios a través de los cuales fluye el vidrio en fase líquida para la *FIBRILACION* están en recipientes de platino o boquillas de platino aleado; calentadas por el paso directo de corriente o calor inducido. El término de boquillas deriva de las pequeñas líneas de orificios en el platino (la mayoría consta de 204 orificios o múltiplos de este número) usados para retirar el vidrio en estado líquido y que pueda ser alimentado por diversas vías.

En un gran tanque, algunos vidrios fundidos y refinados son solidificados como canicas de casi 19mm de diámetro y refundidas en la boquilla antes de hilar las fibras. La sencillez y consistencia del formado de fibras en una boquilla depende fundamentalmente

de la calidad del vidrio que sale por los orificios. El grado de viscosidad a la temperatura de formado y el promedio de cambio de la misma con la temperatura, tiene gran influencia en la *FIBRILACION*.

Los filamentos individuales son generalmente combinados dentro de una hebra, la cual es la construcción básica de un block para productos de filamentos continuos de fibra de vidrio. Por lo tanto la resistencia y los módulos del vidrio son determinadas por la estructura tridimensional, la estructura amorfa se puede observar en la figura 2.2, la cual representa en forma bidimensional un enlace poliédrico en un silicato de sodio, donde cada poliedro es una combinación de átomos de oxígeno alrededor de un átomo de silicio, unidos a otros por unión covalente mientras que el sodio tiene una unión iónica con el oxígeno. La presencia de partículas sólidas muy pequeñas dentro de la estructura pueden llegar a romper seriamente la *FIBRILACION*.

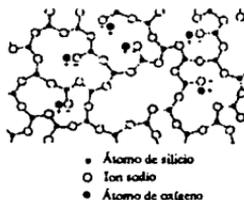


FIG 2.2 Estructura bidimensional del vidrio

La estructura de la red y la resistencia individual pueden variar con la adición de otros óxidos de metal (ver tabla 2.1), por lo que es posible producir fibras de vidrio con diferentes propiedades físicas y químicas. Estas propiedades de las fibras son isotrópicas, así que, el módulo de Young a lo largo de los ejes de las fibras es el mismo que en su dirección transversal, y pueden disminuir debido a la absorción de agua, esto resulta evidente cuando se encuentran en contacto con ácidos minerales.

Un factor que afecta la resistencia del vidrio es el daño causado por el frotamiento entre las fibras durante su fabricación, debido a que los filamentos son altamente abrasivos entre sí, por lo que para minimizar la degradación de la resistencia resultante de tal abrasión y para facilitar el hilado de los filamentos, cada filamento lleva aplicado un aglutinante ("Sieve" o "Brinder") a etapa temprana (antes de formar la hebra), ayudando a minimizar el daño, aunque algunos de ellos son inevitables y se producen a lo largo de la fibra. Lo anterior provoca una variación considerable en la resistencia a la tensión (ilustrada en la fig 2.3).

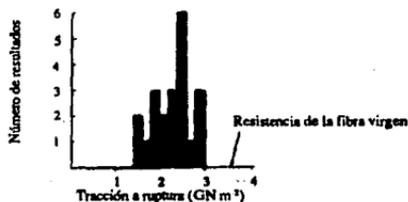


FIG 2.3 Resistencia a tracción de fibras tipo E

El daño mecánico se manifiesta en forma de finas grietas superficiales, estas pueden ser reducidas con "aguafuerte"<sup>1</sup>. El aglutinante utilizado para evitar la abrasión entre las fibras puede ser de tipo temporal, generalmente una emulsión de aceite almidonado, usado durante el manejo de la fibra para la formación de productos de fibra de vidrio y después reemplazado o removido con un agente acoplador vidrio-resina conocido como acabado. Así mismo, el aglutinante puede ser un tratamiento compatible el cual desempeñará necesariamente diversas funciones durante las operaciones de formado:

- a) Actuando como un agente acoplador a la resina durante la impregnación.
- b) Proteger la fibra de daño.
- c) Tener juntas las fibras y facilitar el proceso.
- d) Lubricar las fibras de modo que no existan tensiones abrasivas durante las operaciones subsecuentes del proceso manual o de los rodillos de tracción.
- e) Poseer propiedades anti-estáticas.
- f) Proveer enlace químico entre la matriz e incrementar la resistencia de interfase.

1) Aguafuerte: Mezcla de ácido nítrico y agua, empleada para limpiar y desoxidar la superficie de algunos metales.

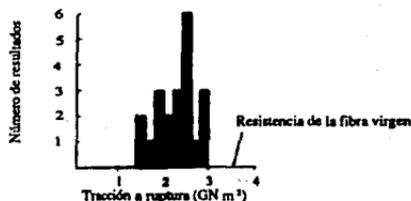


FIG 2.3 Resistencia a tracción de fibras tipo E

El daño mecánico se manifiesta en forma de finas grietas superficiales, estas pueden ser reducidas con "aguafuerte"<sup>1</sup>. El aglutinante utilizado para evitar la abrasión entre las fibras puede ser de tipo temporal, generalmente una emulsión de aceite almidonado, usado durante el manejo de la fibra para la formación de productos de fibra de vidrio y después reemplazado o removido con un agente acoplador vidrio-resina conocido como acabado. Así mismo, el aglutinante puede ser un tratamiento compatible el cual desempeñará necesariamente diversas funciones durante las operaciones de formado:

- a) Actuando como un agente acoplador a la resina durante la impregnación.
- b) Proteger la fibra de daño.
- c) Tener juntas las fibras y facilitar el proceso.
- d) Lubricar las fibras de modo que no existan tensiones abrasivas durante las operaciones subsecuentes del proceso manual o de los rodillos de tracción.
- e) Poseer propiedades anti-estáticas.
- f) Proveer enlace químico entre la matriz e incrementar la resistencia de interfase.

1) Aguafuerte: Mezcla de ácido nítrico y agua, empleada para limpiar y desoxidar la superficie de algunos metales.

## A.2) FIBRA DE BORO

Se marca el inicio de la tecnología del boro en el año de 1963, siendo desarrollada por la fuerza aérea de los E.E.U.U.

Los filamentos continuos de boro que se han desarrollado, tienen una alta potencialidad de uso en compuestos que requieren de alta resistencia y altos módulos. Estos monofilamentos que están siendo manufacturados presentan características típicas como:

Densidad	2.6	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Módulos	4.2x10 <sup>6</sup>	[Kg/cm <sup>2</sup> ]
Resistencia a la tensión	35x10 <sup>3</sup>	[Kg/cm <sup>2</sup> ]
Punto de fusión	2250	[°C]
Dureza	>9	(escala de Mohs)

La relación módulo/densidad es notable por ser casi cinco veces mayor que la de algunas relaciones para filamentos de vidrio que son comunmente usados en aplicaciones de compuestos. La maleabilidad del boro es significativa, ya que el boro es menos sensible que el vidrio a la degradación de la resistencia durante el manejo.

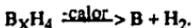
El boro es inherentemente un sólido y un material frágil. Muestra dificultad para fabricarse utilizando técnicas convencionales tales como el estampado, rolado o estirado. En suma, cuerpos de resistencia considerable no pueden ser manufacturados por métodos comunes de formado, tales como, prensado en caliente o sinterizado.

La producción de muchos materiales que son de otra forma difíciles para elaborarse a causa de las propiedades inherentes físicas y mecánicas, pueden ser obtenidos por el chapeado con vapores químicos. Ya que, desde el año de 1911, se reportó la preparación del boro por la reducción del hidrogeno de los haluros volátiles de boro. La preparación del boro por chapeado de vapores químicos ha sido discutida recientemente de una manera completa por diversos investigadores.

Como ya vimos, los filamentos de boro pueden ser preparados de los haluros y de los sistemas hídridos. En el sistema haluro, la reacción es llevada a cabo por la reducción del hidrogeno del gas reaccionante de la manera descrita en la ecuación siguiente:



donde X representa los haluros de Cl, Br o I. Al utilizar la deposición de los hídridos de boro, éstos son afectados por un proceso de descomposición térmica. La deposición del boro del sistema hídrido se comporta de acuerdo a la ecuación general:



La deposición de estos procesos parece ser mejor realizada al reducir la presión. La ventaja de los sistemas hídridos es que el boro puede ser chapeado a bajas temperaturas de deposición, donde ambas rutas mostradas producen capas consistentes de boro.

La naturaleza del proceso de chapeado con vapores químicos, requiere de una capa caliente para la deposición de las capas de boro. La capa puede tener un alto punto de fusión y mantiene suficiente resistencia para permanecer intacta a la temperatura de deposición. Al evaluar capas refractarias, se observó que los hilos de tungsteno utilizados como base, son los que muestran mejores resultados, considerando la combinación de manejo y resistencia.

#### A.2.1) Fabricación.

El diagrama del proceso para la producción continua de filamentos de boro está mostrado en la figura 2.4. El hilo es jalado a través de la cámara por los motores de alimentación y de extracción y es calentado eléctricamente a la temperatura deseada. El mercurio sirve como contacto eléctrico tanto como el gas en la cámara sellada. El hilo alimentado es limpiado con gas a presión o por una cámara limpiadora antes de la cámara de deposición. Una mezcla de gases que favorecen la reacción es pasada a través de la cámara de deposición a presión positiva, donde está en contacto el hilo calentado y el boro depositado. Si se desea tener un aparato multi-fase, la cámara simple puede ser apilada.

A altas temperaturas de deposición (mayores de 1250°C a 1316 °C) los cristales grandes a menudo aumentan en ciertas áreas cristalinas y son más débiles que el material adyacente.

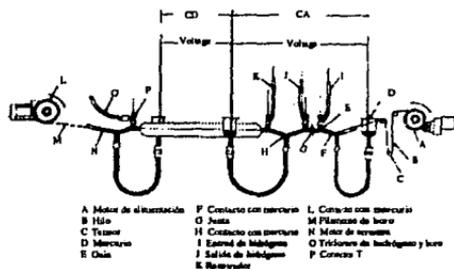


FIG 2.4 Elaboración de Fibras de Boro

El boro depositado en la fase vapor puede existir en diferentes configuraciones estructurales. Donde la configuración obtenida durante un recorrido es primero dependiente de la reacción de los gases usados y la temperatura a la cual la capa es depositada. La estructura que proporciona valores constantes de resistencia es la llamada "amorfa" (boro microcristalino), teniendo un rango limitado de temperaturas, para poder producir un material estructuralmente homogéneo.

La figura 2.5 muestra un diagrama esquemático de las características de un filamento de boro en donde todas las superficies de los filamentos producidos tienden a ser similares. La superficie puede ser descrita como áreas o módulos preferentemente desarrolladas, separadas por límites definidos. El tamaño de los módulos varía de capa a capa, donde la tendencia generalmente mostrada es debida a que los módulos empiezan como un núcleo individual y crecen conforme el procedimiento continúa. Aun los filamentos producidos en sistemas multi-cámaras muestran las mismas características superficiales.

El principio de la capa superficial es la deposición del boro en conos, ya que el tipo de crecimiento es similar al del carbón pirolítico, que de acuerdo al número de cámaras se observa que tienen una estructura en capas (límites definidos) debido al apagado de contactos intermedios de mercurio, teniendo como resultado la suma del apilamiento de cada cámara.

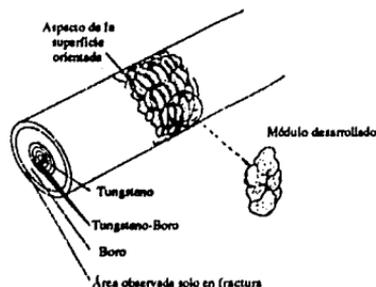


FIG 2.5 Diagrama del filamento de Boro

El orden de aparición de los módulos en la superficie puede ser atribuido al evaporamiento observado a lo largo de la nucleación y crecimiento del material, los conos adyacentes a las marcas o incisiones crecen más rápidamente. Esto fue demostrado, rayando una lámina de tungsteno y depositando capas de boro de varios espesores.

Durante la deposición del boro, la capa de 12.7 micras de tungsteno es convertida en borato de tungsteno por la difusión y la reacción del boro con el tungsteno. El desarrollo procede de la formación inicial de WB, además de  $WB_4$  y  $W_2B_5$ . Las tres fases coexisten algunas veces durante la deposición, excepto en la producción final del filamento, donde sólo  $W_2B_5$  y  $WB_4$  están presentes en grandes cantidades. Y con una deposición con tiempos de templado extremadamente grandes, el  $WB_4$  parece ser la única fase presente y en un periodo normal de producción el tungsteno es completamente reducido. El tiempo requerido para la completa reducción del tungsteno original, dependiente de la temperatura de deposición, es usualmente de 30 a 35 seg.

El boro se difunde dentro del tungsteno más rápidamente que el tungsteno hacia el exterior, durante la deposición. Esto es mostrado por la interfase discreta entre el volumen depositado y el centro, y la restricción del centro a la región central del filamento. Por medio de micropruebas electrónicas trazadas a través de la sección, se han observado pequeños vacíos y tentativamente se atribuyen a la rápida difusión entre los dos materiales (*efecto Klinkerdall*). Así mismo, se ha demostrado que los volúmenes depositados en filamentos producidos rutinariamente, contienen altos esfuerzos residuales. La primera causa en el volumen del material es la formación del centro mientras están siendo depositadas las capas de boro, ya que el material crece de un diámetro original de  $1.27 \times 10^{-2} \text{mm}$  a un diámetro final de  $1.65 \times 10^{-2} \text{mm}$ , colocando las capas depositadas de boro en tensión.

Otros factores tales como la variación de temperatura durante el crecimiento, la expansión térmica desigual entre la superficie y el centro, y el enfriamiento en el mercurio de contacto también contribuyen a delinear esfuerzos residuales. El encontrar esfuerzos residuales no es constante en todo el filamento, y se ha observado que la variación es considerable en magnitud así como en dirección. También se ha notado una variación en dureza, en mediciones hechas en la región interfacial exterior, lo que implica variación en densidad del material depositado. Este fenómeno es la consecuencia probable de un proceso de recocido causado en la parte interior del depósito que se encuentra a la temperatura de deposición en un largo período de tiempo, mientras que las capas externas se van enfriando.

En la actualidad es más utilizado el boro que el grafito, pero requiere mayor equipamiento para la colocación de las fibras en la matriz de resina con un alto grado de precisión. El problema que existe con las reacciones químicas entre el boro y otros metales se está estudiando; una solución a estos problemas es el descubrimiento de la fibra "borsic"<sup>2</sup> con carburo de silicio (fig. 2.6).

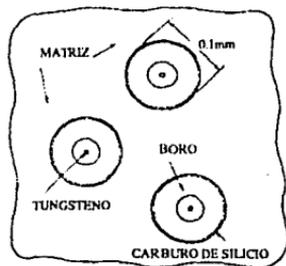


FIG 2.6 Fibra borsic con carburo de silicio

2) Borsic: Fibra formada por un alambre de tungsteno cubierto con grafito y rodeado de boro, siendo ya la fibra misma un compuesto

### A.3) FIBRA DE GRAFITO (CARBON)

La fibra de grafito no es un material de desarrollo reciente, ya que se produjo en pequeñas cantidades en el siglo XIX para usarse en filamentos de lámparas incandescentes.

El carbón es un elemento no metálico. El carbón negro cristalino, conocido como grafito, tiene una gravedad específica de 2.25; mientras que el carbón transparente "diamante" tiene una gravedad específica de 3.5. Ambos son formas alotrópicas del carbón, como lo son el coque y el carbón vegetal. El grafito y el diamante tienen un alto punto de fusión alrededor de los 3479°C, encontrándose justificado al examinar la estructura cristalina y al observar la red infinita de la unión covalente carbón-carbón que tiene que ser rota para fundir este material.

Los átomos de la fibra poseen un arreglo cristalino en forma hexagonal, los que se superponen unos sobre otros para formar una secuencia periódica del tipo ABABA. Los átomos en este nivel poseen una gran fuerza covalente, sin embargo, son débiles las fuerzas de Van Der Waals entre las capas, significando que la unidad cristalina es altamente anisotrópica. La estructura, en estos casos, se encuentra formada por un espaciamiento promedio de 0.34 nanómetros, entre los planos basales.

#### A.3.1) Fabricación.

El proceso de fabricación de las fibras consiste en utilizar una base orgánica llamada precursor, que contiene un alto porcentaje de átomos de carbón. Hoy en día son usados diversos métodos para elaborar las fibras de grafito de longitudes y diámetros variables, al igual que la versatilidad para el proceso de las fibras de vidrio.

Los módulos de la fibra de grafito dependerán en un alto grado de la perfección de alineación con las condiciones y rutas de producción. Como se observa en la figura 2.7, existen imperfecciones y cavidades alineadas a la fibra, lo que ocasiona puntos de debilitamiento, actuando como esfuerzos incorporados y reduciendo así la resistencia. Otro tipo de debilitamiento son las cavidades superficiales, así mismo, la característica de presentar pequeños cristales que se encuentran en la sección transversal y que afectan a las propiedades y el efecto de cortante en el grafito.



FIG 2.7 Representación esquemática de la estructura de las fibras de carbono basada en difracción de rayos X y microscopía electrónica

De aquí que se hayan desarrollado tres formas para producir fibras orientadas en su eje, de las cuales hablaremos a continuación:

a).- Orientación del polímero por estiramiento.

Inicialmente se utiliza el PAN (Poliacrilonitrilo). Este es un material polímero parecido al polietileno en conformación molecular, con la diferencia de que el grupo del hidrógeno es reemplazado por un agrupamiento de nitrilo [  $-C\equiv N$  ].

En la primera fase del proceso, el PAN es convertido en una fibra, donde es estirado para alinear las cadenas moleculares a lo largo de la fibra. Cuando las fibras son calentadas los grupos activos del nitrilo interactúan y producen una gúta consistente de una fila de seis miembros anillados. (fig 2.8).

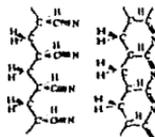


FIG 2.8 Cambio de la molécula flexible a rígida del PAN

Mientras que la fibra está inmóvil bajo tensión, es calentada en una atmósfera de oxígeno, la cuál es inducida para favorecer la reacción química y la formación de enlaces cruzados entre la gafa de moléculas. La oxidación del PAN es reducida para dar la estructura anillada del carbón, lo que es convertido a grafito "turbostrático"<sup>3</sup> por calentamiento a altas temperaturas. Siendo los módulos y la resistencia de la fibra dependientes de la temperatura, que determinará el tamaño de los cristales y su alineación.

#### b) Orientación por hilado

Este proceso involucra el hilado de resina fundida para producir fibras. El petróleo o alquitrán de hulla es térmicamente tratado a temperaturas por encima de los 350 °C para convertirlo por polimerización en una fase intermedia, la cuál contiene ambas fases (fase líquida y cristalina). Esta resina es transformada en hilos a través de un devanador multiagujeros para producir un hilo "verde". Durante el proceso de devanamiento, los efectos hidrodinámicos en los orificios provee la orientación planar de las moléculas.

El hilado es hecho infusible por oxidación a temperaturas abajo del punto de ablandamiento para evitar que se peguen con los otros filamentos, siendo posteriormente carburizado a 2000 °C mientras es tensionado para prevenir el relajamiento y pérdida de la orientación. El tamaño final del cristal es mayor en la fase intermedia que las fibras de PAN o rayón.

#### c) Orientación durante la grafitización

Las fibras a altas temperaturas pueden ser estiradas durante la fase de grafitización, dando así un deslizamiento entre capas de grafito, proporcionando la orientación entre ellas, paralelas al eje de la fibra.

Dependiendo del proceso utilizado, la perfección del alineamiento y básicamente del precursor particular, del cual se hayan obtenido, variarán las propiedades específicas de cada fibra.

---

3) Grafito Turbostrático: una de las formas alotrópicas del carbón.

A continuación se muestra una tabla donde se especifican algunas características mecánicas de fibras de grafito convencionales. (tabla 2.2)

Denominación comercial de la fibra	Precursor	Diámetro en $\mu\text{m}$	Densidad en $\text{g}/\text{cm}^3$	Alargamiento en la ruptura %	Resistencia a tracción		Módulo de Young	
					en $\text{Kp}/\text{mm}^2$	en $\text{MN}/\text{m}^2$	en $\text{Kp}/\text{mm}^2$	en $\text{GN}/\text{m}^2$
Thomel 50	Rayón	6.6	1.63	—	201	1971	53200	345
Thomel 75	Rayón	6.4	1.86	—	265	2594	52800	518
Thomel 75s	Rayón	6.0	—	0.5	254	2490	53504	525
Thomel 30s	Rayón	6.6	1.67	0.5	190	1863	40128	394
Thomel 300	Pan	6.9	1.76	1.1	253	2484	24000	235
Thomel 400	pastoso	7.6	1.78	1.3	300	2942	22528	221
Thomel Mat VMA	—	9.0	1.99	—	141	1376	24640	241
Thomel P	Pub	—	1.99	5.0	141	1379	38720	380
Torayca	PAN	8.3	1.78	0.9-1.0	200	1962	20000	196
T200A	—	—	—	—	240	2354	25000	245
Torayca	Húmedo	8.3	1.78	0.9-1.2	250	2452	22000	216
T300A	—	—	—	—	310	3040	25000	245
Torayca M	PAN	7.6	1.80	0.5-0.7	200	1960	37000	363
40A	pastoso	—	—	—	250	2450	43000	422
Rígido AG	PAN	11.0	2.10	—	82	800	25500	250
Rígido AX	pastoso	12.4	1.7-1.8	—	102	1000	30600	300
Grafil HM	PAN	7.5	1.86	0.74	194	1900	17340	170
Grafil HT	Húmedo	8.0	1.7	1.27	224	2200	18360	180
Modmor I	PAN	7.5	2.0	—	173	1700	39270	385
Modmor II	Húmedo	8.0	1.7	—	214	2100	42330	415
Hitea	PAN Húmedo	5.9	1.71	—	245	2400	21114	207
Fortail 5-Y	PAN	—	1.9	—	286	2800	—	—
Fortail CG3	seco	—	1.80	—	173	1700	39270	385
Magnanite AS	PAN	7.9-8.1	1.80	1.3	214	2100	42330	415
Magnanite HTS	Húmedo	7.4-7.8	1.80	0.1	245	2400	21114	207
Magnanite HMS	—	—	—	—	286	2800	—	—
Panex 300 y 30Y/800d	PAN	8.0	1.74	1.3	211	2059	35200	345
Celcon GY50	Húmedo	—	1.75	—	211	2059	35200	345
Celcon GY70	Húmedo	8.0	1.96	0.7	91.52	898	36608	359
Celcon 3000	—	7.0	1.76	1.2	176	1723	17600	172
Sigrafil P	Pub	7-12	—	3.0	289	2826	21120	207
Sigrafil HF	PAN	7.0	1.8	1.3	282	2758	23936	234
Sigrafil HM	Húmedo	7.0	2.0	0.6	282	2758	23936	234
Sig. UHM	—	6.8	2.0	0.5	239	2344	35200	345
Besflight HT	PAN	7.0	1.77	1.3	239	2344	35200	345
Besflight ST	pastoso	6.6-6.7	1.8	0.6	158	1551	26752	262
Besflight HM	—	6.4	1.95	0.4	252	2470	36400	365
Besflight SM	—	—	—	—	176	1723	54208	531
					310	30033	25344	248
					102	1000	4182	41
					306	3000	24480	240
					201	2000	31680	340
					201	2000	40800	400
					310	3078	24000	233
					350	3430	24000	233
					350	2450	35000	343
					350	960	45000	411

Tabla 2.2 Características mecánicas de las fibras de grafito convencionales más conocidas

*En términos generales se puede decir que las fibras de compuesto carbón/grafito ofrecen una combinación de propiedades de bajo peso, alta resistencia mecánica y rigidez superiores a las ofrecidas por los materiales fibrosos metálicos y no metálicos convencionales utilizados para diversas condiciones de trabajo.*

Una desventaja del grafito es su pobre resistencia al oxígeno, ya que empieza a oxidarse en el aire casi a 427°C. Al igual que los metales, no está formado por una capa protectora, por lo que al oxidarse es muy volátil. Ahora ya se han diseñado diversos recubrimientos rígidos para proteger al grafito de la oxidación, uno de los cuales es el carburo de silicio, que protege al grafito por tiempo limitado a temperaturas aproximadas de 1647°C. Otra limitación de las fibras de grafito es que son un material frágil, sensible al esfuerzo ya que no puede ofrecer gran resistencia al impacto.

Las fibras de grafito se fabrican en las formas siguientes:

- Fibras continuas
- Preestirado unidireccional arrastrando una cinta en un ancho de 76-914mm para formar láminas
- Fibras cortas
- Superficies extruidas
- Fabricado de entretejidos como telas frescas o preparadas para laminación

#### A.4).- FIBRAS ORGANICAS (KEVLAR)

Estas fibras poseen alta resistencia y rigidez la cual es posible en polímeros completamente alineados, por ejemplo, largas cadenas de cristales sencillos de polietileno en zig zag de carbón a carbón, formando un eslabón de cadenas totalmente alineadas.

La comercialmente usada es la fibra kevlar, patentada en 1968 e introducida en el año de 1972 y producida por la familia Du pont.

#### A.4.1) Fabricación.

El Kevlar puede ser obtenido de la poliamida llamada "Poliparafenilanoftalámid". Sus fibras son producidas por extrusión e hilado. Una solución de los polímeros en un solvente es contenida a temperaturas que varían de  $-50$  a  $-80$  °C, antes de extruirse dentro de un recipiente calentado a  $200$  °C, evaporando así el solvente. Las fibras resultantes son extruidas por un aparato, en este punto poseen una resistencia de  $840 \text{ MN m}^{-2}$  y un módulo de  $3.6 \text{ GN m}^{-2}$ , después se le da el alargamiento y el tratamiento de hilado, lo que incrementa su resistencia y rigidez. De ahí que el objetivo de los procesos sea en alineamiento de moléculas paralelas al eje de la fibra, mostrando módulos de  $130 \text{ GN m}^{-2}$  e indicando que se ha logrado un alto alineamiento. Una representación esquemática es mostrada a continuación. (Fig 2.9)

En esta figura se observa que las hojas están arregladas en forma radial, laminadas en forma axial. Por lo que el ángulo entre componentes adyacentes de los pliegues sea de  $170^\circ$ , provocando que las fibras con esta estructura tengan un bajo módulo cortante longitudinal, baja propiedad transversal y baja resistencia a la compresión. Este tipo de fibra posee buena resistencia a la temperatura, por ejemplo, tiene un 12% de reducción de fuerza después de 10 horas a  $250$  °C y un 5% de reducción después de 500 horas a  $160$  °C.

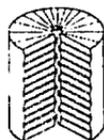


FIG 2.9 Representación esquemática de la estructura supramolecular de las fibras Kevlar 49

Dos ejemplos de este tipo de fibras son el Kevlar 49 y el Kevlar 29. El Kevlar 49 posee una gran resistencia específica a la tensión, en comparación a fibras de reforzamiento comercialmente aprovechadas y más altos módulos a la tensión que el vidrio y el aluminio. Sin embargo no presentan una alta rigidez como las fibras de boro y grafito. Estas propiedades tan completas son la clave para ser usadas sucesivamente en industrias exigentes en el peso, tales como, aeronaves y vehículos espaciales.

El Kevlar 29 con una fuerza a la tensión de 3 GPa y módulos de 80 GPa. Comparado con el Kevlar 49 con la misma fuerza a la tensión y módulos de 120 GPa, el Kevlar 29 es utilizado especialmente para aplicaciones industriales en cuerdas, cables, revestimientos protectores y fabricación de cubiertas donde la resistencia a la tensión y picado son igualmente importantes.

#### A.5) HILOS METALICOS

El uso de hilos metálicos y aleaciones como reforzamiento no es nueva y muchos ejemplos pueden ser citados, tales como concreto reforzado, la construcción radial de acero de los neumáticos (ver figura 2.10), mangueras de presión reforzadas y cubiertas de cohetes con filamentos enrollados. Un factor común en todas estas aplicaciones es el diámetro relativamente grande de los hilos de reforzamiento. 5600 hilos de acero de alto carbón, en el caso particular de un neumático. En algunos casos, los grandes diámetros de los hilos, están en relación a la economía o utilidad, mientras que en otros la naturaleza de la matriz es un factor importante.



FIG 2.10 Construcción radial de dos neumáticos

Para la mayoría de las aplicaciones de metales como reforzamientos medios, y la eficiencia de estos reforzamientos están en función de los siguientes parámetros:

- Disposición de la razón de proporción
- La razón de volumen
- Superficie de la fibra a razón de volumen
- Dispersión o arreglo geométrico

El aumento en eficiencia se puede esperar por una reducción del diámetro del hilo y como efecto de parámetros más altos.

En suma, un aumento en flexibilidad es deseable para aplicaciones de reforzado en ciertas gomas, donde el duplicar la vida del material es de principal importancia, para facilitar el enrollado de filamentos y proveer un medio de fabricación de formas textiles anteriores a su embobinado en la matriz. En la tabla 2.3 se muestra una interesante clasificación de los módulos elásticos para diámetros extremadamente finos aprovechando la flexibilidad de las fibras textiles convencionales.

Material	Módulo de elasticidad	Diámetro requerido
Nylon	2.76	19.0
Carbón	4.83	16.8
Fibra de Vidrio	55.2	9.1
Silicón fundido	68.9	8.6
Niobio	157	7.1
Níquel, Hierro	207	6.6
Tungsteno, Molibdeno	345	5.8

Tabla 2.3 Diámetro de materiales con flexibilidad igual al nylon  
El módulo está dado en  $\text{Pax } 10^9$  y el diámetro en micrones(+)  
(+) Diámetros requeridos para dar flexibilidad a  $19 \mu$  de filamentos de nylon

Tabla 2.3 Comparación de los módulos entre fibras.

#### A.5.1) Fabricación.

Hay muchas técnicas, cada una de las cuales puede o ha sido aplicada para la elaboración de finos filamentos metálicos o fibras, estas técnicas se clasifican de la siguiente forma:

- Mecánica
- Electroquímica
- Metal-líquido
- Deposición de vapor
- Procesos apropiados

Estos procesos pueden incluir el "trefilado" del alambre. El alambre trefilado ha sido extensamente aplicado para muchos metales y aleaciones, presentando serias limitaciones en el control de la reducción de los diámetros que se ofrecen. Mientras que los procesos mecánicos de punzonado y cortado de láminas provee medios de producción directa de un metal de forma voluminosa a un filamento en una operación simple, donde los procesos de cortado no confieren daño alguno al material, por lo que se esperan propiedades mecánicas similares para el filamento y el material de origen.

La aplicación de métodos electroquímicos en la formación de filamentos han recibido particular atención al mostrar facilidad de producción de filamentos de níquel, en un seleccionador inclinado hacia arriba del mandril helicoidal cilíndrico. La limitación de los procesos electroquímicos, se basa en la clase de metales y aleaciones para los cuales, el proceso es aplicable y el costo del procesamiento resulta de la baja velocidad de chapeado y la complejidad del mandril.

La preparación de los filamentos directamente de la fundición, parece ser la solución más económica al problema de proveer una base de fibra metálica, ya que esta técnica es más conocida en la producción de fibras o filamentos no metálicos, tales como, vidrio y ciertos materiales orgánicos. Desafortunadamente las técnicas ya desarrolladas para estos materiales no pueden ser directamente aplicadas para metales, particularmente aquellos de altos puntos de fusión, por las razones siguientes:

- a) Las altas temperaturas alcanzadas limitan la selección de materiales para el dado y el contenedor.
- b) La baja tensión superficial y viscosidad de metales fundidos evitan la aplicación directa de las técnicas desarrolladas para plásticos y vidrios.

La aplicación de los métodos de deposición de vapor para la producción de filamentos metálicos se han desarrollado más recientemente, en respuesta a los métodos empleados en los filamentos de boro, pero se ven limitados por el diámetro final, en relación con las propiedades físicas y el volumen de material depositado. Muchos de los

procesos para la fabricación de materiales en forma de filamentos, son necesariamente y consecuentemente breves. Sin embargo están basados en una o más técnicas básicas, conteniendo quizás un método nuevo para controlar un proceso específicamente variable.

En el campo de fibras metálicas, el avance más significativo ha sido hecho por la corporación "BRUNSWICK" en conexión con sus series "MF" de filamentos metálicos, particularmente la "MF A-1", la cual, es de acero inoxidable (tipo 304) que ofrece una resistencia última a la tensión de  $6.89 \text{ a } 2.07 \times 10^8 \text{ Pa}$ , con un rango de diámetro de 4 a 50 micras y precios de bajo costo nunca antes aplicados a filamentos metálicos. Las propiedades de metales y aleaciones en forma de filamentos pueden ser esperadas, asociandolas generalmente con el material por tres razones:

- Proceso (variables dependientes)

- \* Uniformidad de la sección transversal.
- \* Características superficiales.
- \* Contaminación.
- \* Tamaño de grano.
- \* Textura.
- \* Trabajo en frío.
- \* Efectos de la relación de enfriamiento.

- Material (variables dependientes).

- \* Limpieza (contenido de inclusiones).
- \* Macro o micro segregación.
- \* Tamaño y distribución de la segunda fase (en aleaciones).
- \* Análisis químicos.

- La experimentación de los filamentos presenta un problema mayor en la manipulación que en el diseño de la prueba en si, por ejemplo, para la

simple prueba de tracción se deben considerar entre otras cosas precargas (incluyendo esfuerzos torsionales), el aspecto promedio del espécimen de prueba, la proporción de deformación y finalmente el número de pruebas para lograr una verdadera representación real de las propiedades investigadas y las ya existentes.

## **B. Clasificación**

Para el análisis de las propiedades, los compuestos reforzados con fibras se clasifican en 4 tipos:

- a) Fibras largas y orientadas
- b) Fibras largas y desorientadas
- c) Fibras cortas y orientadas
- d) Fibras cortas y desorientadas

de las cuales se hablará a continuación.

### a) Fibras largas y orientadas

#### a. 1) Relaciones esfuerzo-resistencia de las fibras

Para determinar las relaciones esfuerzo-resistencia para fibras continuas, partamos del caso ideal en que las fibras se encuentran dispersas uniformemente en el compuesto, que son unidireccionales y firmemente unidas en la matriz.

Como se observa en la figura 2.11, la carga del compuesto ( $P_c$ ) se distribuye entre las fibras y la matriz, donde:

$$P_c = P_M + P_f \dots 1$$

En términos de esfuerzos

$$\sigma_c A_c = \sigma_M A_M + \sigma_f A_f \dots 2$$

$$\sigma_c = \sigma_M V_M + \sigma_f V_f \dots 3$$

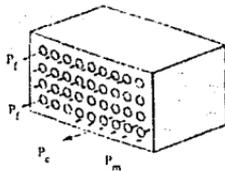


FIG 2.11 Modelo de un compuesto con fibras

Donde A = área y V = fracción de volumen

Suponiendo que no hay desgarramiento en la interfase, la deformación experimentada por el compuesto es igual a la de la fibra y la matriz

$$\epsilon_c = \epsilon_M = \epsilon_f \dots 4$$

Donde  $E = \sigma/\epsilon$  (Ley de Hooke), entonces de (3):

$$\sigma_c = E_M \epsilon_c V_M + E_f \epsilon_c V_f \text{ ó } \sigma_c = E_M \epsilon_c V_M + E_f \epsilon_c (1 - V_M) \dots 5$$

A partir de que  $V_f + V_M = 1$ , de (5):

$$E_c = E_M V_M + E_f (1 - V_M) \dots 5'$$

La relación de módulos nos queda

$$\frac{E_f \epsilon_c (1 - V_M)}{E_M \epsilon_c V_M} = \frac{(1 - V_M) E_f}{V_M E_M} = \frac{\text{Carga de la fibra}}{\text{Carga de la matriz}} \dots 6$$

Un ejemplo es mostrado en las gráficas 2.12 y 2.13, en base a la relación de módulos y la fracción volumen de la fibra nos muestra el porcentaje de carga total soportado por la fibra, lo que hace evidente que para alcanzar una mayor resistencia en los reforzamientos, es necesario tener módulos mayores de las fibras que los de la matriz. El porcentaje máximo de volumen de fibras es del 91%, ya que por encima del 80% la matriz pierde la capacidad para mojar e infiltrarse entre las fibras. Resultando en una unión pobre y vacíos en el compuesto.

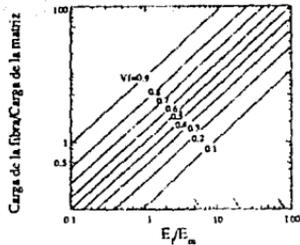


FIG 2.12 Gráfica módulo contra carga con diferentes fracciones de volumen

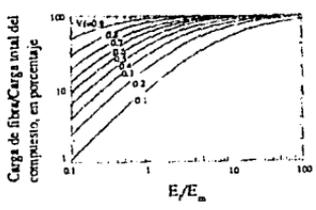


FIG 2.13 Gráfica módulo contra porcentaje de carga de diferentes fracciones de volumen

La deformación de un material compuesto procede de acuerdo a estos cuatro estados:

- a) La fibra y la matriz se deforman elásticamente
- b) Las fibras continuas se deforman elásticamente, pero la matriz se deforma plásticamente
- c) La fibra y la matriz se deforman plásticamente
- d) Las fibras se fracturan mostrando fractura compuesta.

Para el estado "a", el módulo del compuesto puede ser determinado por la ecuación (5). En el estado "b" la curva esfuerzo-deformación de la matriz no es lineal, por lo que el módulo debe ser calculado para cada nivel como sigue:

$$E_c = E_f V_f + (d\sigma_M/d\varepsilon_M)_{E_f} V_M \dots 7$$

Donde  $(d\sigma_M/d\varepsilon_M)_{E_f}$  es la pendiente de la curva.

El estado "c" no se realiza con fibras frágiles y el módulo para los compuestos con fibras dúctiles se analiza igual que en el estado "b".

## a.2) Resistencia última a la tensión

Dado el estado ideal y una fracción de volumen mínima de fibras, la resistencia última a la tensión es dada por

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu}^* V_f + (\sigma_M)_{\epsilon f} (1 - V_f), \quad V_f \geq V_{min} \dots 8$$

Donde  $\sigma_{fu}^*$  es la resistencia última a la tensión y  $(\sigma_M)_{\epsilon f}$  es la resistencia en la matriz cuando las fibras son deformadas a su resistencia última a la tensión.

Para matrices metálicas reforzadas con fibras, la resistencia del compuesto se calculará con la ecuación (8), considerando que la resistencia última del compuesto será mayor o igual que la resistencia última de la matriz ( $\sigma_{cu} \geq \sigma_{Mu}$ ). De esta ecuación se define una fracción de volumen crítica de fibras que es:

$$V_{crit} = \frac{\sigma_{Mu} - (\sigma_M)_{\epsilon f}}{\sigma_{fu}^* + \sigma_{Mu} - (\sigma_M)_{\epsilon f}} \dots 9$$

A pequeños valores de  $V_f > V_{min}$  la resistencia del compuesto se reduce a la resistencia de la matriz, tal que, se llegará a la falla inmediata del compuesto si se excede de  $\sigma_{cu} > \sigma_{Mu} V_M$ . Esto define una fracción mínima de volumen ( $V_{min}$ ), que con la condición anterior nos queda:

$$V_{min} = \frac{\sigma_{Mu} - (\sigma_M)_{\epsilon f}}{\sigma_{fu}^* + \sigma_{Mu} - (\sigma_M)_{\epsilon f}} \dots 10$$

Las fracciones de volumen  $V_{crit}$  y  $V_{min}$  se muestran en la figura 2.14. La interacción de las líneas corresponde a  $\sigma_{cu}$  dado por la ecuación (8) y la condición anterior determina que  $V_{min}$ , siempre es menor que  $V_{crit}$ . Mostrando que a valores menores de  $V_{min}$ , actúa como una matriz no reforzada.

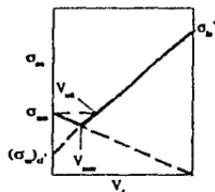


FIG 2.14 Variación teórica de la resistencia del compuesto

## b) Fibras largas y desorientadas

### b.1) Variación de la resistencia y criterios de falla

En los materiales compuestos con fibras continuas, difícilmente se va a dar una orientación al azar de dichos reforzamientos, ya que por sus características generales se considera la orientación preferencial con respecto a un eje.

Existen tres modos de falla en una lámina ensayada a tracción unidimensional a un ángulo  $\theta$  de la fibra y son: Falla a tracción transversal, falla a tracción longitudinal y falla por cortante interlaminar.

Para los tres modos de falla tomemos en cuenta las condiciones de que:  $\sigma_{11} = \sigma_{11}^*$ ,  $\sigma_T = \sigma_T^*$  y  $\sigma_H = \tau_H^*$ , los que para un esfuerzo aplicado se calcula como:

$$\sigma_{11} = \sigma_{\theta} \cos^2 \theta$$

$$\sigma_T = \sigma_{\theta} \sin^2 \theta$$

$$\sigma_H = -\tau_{\theta} \sin \theta \cos \theta$$

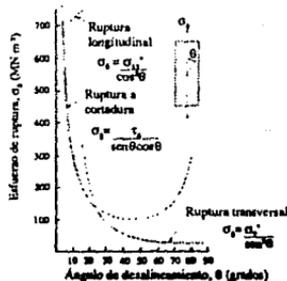
(Falla Longitudinal)

(Falla Transversal)

(Falla a Cortante)

Al analizar la gráfica 2.15 se observa la dependencia de la resistencia a ruptura con la orientación fuera de ejes de las fibras en láminas unidireccionales, tomando como base la teoría del máximo esfuerzo.

FIG 2.15 Dependencia de la resistencia a ruptura con la orientación para ensayos fuera de ejes sobre láminas unidireccionales para la teoría del esfuerzo máximo



c) Fibras cortas y orientadas

El comportamiento de compuestos reforzados con fibras de longitud finita,  $l$ , no se puede predecir como en el caso de las fibras continuas, a menos que esta longitud,  $l$ , sea mayor a la longitud crítica,  $l_c$ . Debido a que una parte de los extremos de cada fibra es llevada a un esfuerzo menor al máximo de la misma, siendo continua, como se muestra en las figuras 2.17 y 2.18. Donde se observa la ineffectividad de la parte final (longitud crítica de transferencia) de cada fibra sobre la cual el esfuerzo  $\sigma_{fmax}$  de la fibra es disminuido a cero para  $l_c/2$ , donde se define  $B$  como el promedio del área bajo la curva de distribución de esfuerzos sobre la longitud  $l_c/2$  y  $\sigma_{fmax}$ , ya que la longitud mínima necesaria para obtener el máximo esfuerzo a un punto es  $l_c$ .

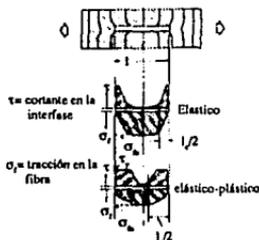


FIG 2.17 Representación esquemática del esfuerzo cortante en la interfase

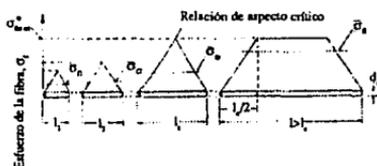


FIG 2.18 Esfuerzo promedio de la fibra

El esfuerzo promedio en las fibras discontinuas es menor que el esfuerzo de rompimiento  $\sigma_{fu}^*$  cuando la fibra es alargada para fallar, el cual es:

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_f [1 - (1-B)(l_c/l)] \dots \dots 11$$

Para una matriz plástica que tiene un esfuerzo dado  $\tau_{My}$  y  $B$  igual a  $1/2$ , la ecuación anterior se convierte en:

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_f (1 - l_c/2l) \dots \dots 12$$

Mientras que la longitud crítica de la fibra requerida para alcanzar el esfuerzo máximo de la fibra de acuerdo a la relación crítica longitud-diámetro es:

$$l_c/d_f = \sigma_{fmax}/2\tau_{My} \dots\dots 13$$

Para matrices que pueden endurecerse por el trabajo,  $\sigma_{sc}$  se identifica como la resistencia última al cortante de la matriz y si la falla interfacial ocurre primero,  $\tau$  puede representar la resistencia interfacial de corte.

Dows ha desarrollado una ecuación considerando el comportamiento elástico de la fibra y la matriz, representada como sigue:

$$\frac{l_x}{d_f} = \frac{\cosh^{-1}[1/(1-\Phi)]}{\Gamma} \dots\dots 14$$

Donde  $l_x$  es la distancia a lo largo de la fibra considerada desde un extremo,  $d_f$  el diámetro de la fibra y  $\Phi = \sigma_f/\sigma_{fmax}$ , además:

$$\Gamma = \frac{24(G_f/G_M)[1+(V_f/V_M)(E_f/E_M)]^{1/2}}{1-3(G_f/G_M)+2(G_f/G_M)[(V_f^{2/3}-1)/(V_f^{-1}-1)]}$$

La longitud crítica de la fibra para una matriz elástica,  $(l_c)_{el}$ , queda definida como la longitud de una fibra corta capaz de recoger el 97% de los esfuerzos de una fibra infinitamente larga ( $\Phi=0.97$ ). Por simetría  $(l_c)_{el}$  de la ecuación 14 nos queda

$$(l_c)_{el}/d_f = 8.40/\Gamma \dots\dots 15$$

Utilizando la solución de Dows, Sutton mostró que el esfuerzo promedio se puede calcular de la forma siguiente:

$$\sigma_f = \sigma_{f1} \left[ \frac{1 - \operatorname{sen}^{-1} \tanh[\Gamma(l/d_f)]}{\Gamma(l/d_f)} \right] \dots 16$$

Una comparación de las relaciones de aspecto crítico para ambas matrices, elástica y plástica ideal, es mostrada en la figura 2.17 y en la tabla 2.5.

$V_f$	Relación de aspecto crítico $l_c/d_f$			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en Ag*		W en Cu*	
	Elástico	Plástico	Elástico	Plástico
0.10	9	62	9	8.2
0.25	4	62	4	8.2
0.50	2	62	2	8.2

Tabla 2.4 Relación de aspecto crítico para fibras sumergidas en matrices elásticas y plásticas

\* W:  $\sigma_f = 1.24 \times 10^9$ ; Cu:  $\tau(\text{calc}) = 75.8 \times 10^6$ ; Ag:  $\sigma_f = 6.89 \times 10^9$ ;  $\tau_y = 55.2 \times 10^6$ , unidades en Pa.

Como en el caso de materiales compuestos de fibras continuas (ecuación 8), la condición de que se pueda exceder la resistencia última de la matriz pero para materiales con fibras discontinuas se define el volumen crítico de las fibras como sigue:

$$(V_{\text{crit}})_{\text{disc}} = \frac{\sigma_{Mu} \cdot (\sigma_M)_{\text{el}} \Gamma}{\sigma_{fu} [1 - (1/B)x] - (\sigma_M)_{\text{el}} \Gamma} \dots 17$$

#### d) Fibras cortas y desorientadas

Los compuestos de fibras discontinuas y desorientadas son elaborados por inyección o moldeado a presión.

El problema de la predicción de propiedades de compuestos de fibras cortas desorientadas es complejo, por lo que en forma general se han desarrollado algunas ecuaciones empíricas. La siguiente ecuación se puede utilizar para la predicción de los módulos de compuestos que se encuentran orientados al azar en un plano

$$E_{\text{azar}} = 3/8 E_L + 5/8 E_T$$

Donde  $E_L$  y  $E_T$  son respectivamente los módulos longitudinal y transversal de un compuesto de fibras cortas alineadas, presentando la misma relación de aspecto y la fracción de volumen de la fibra, del compuesto bajo consideración. Mientras que los módulos se determinan experimentalmente utilizando las ecuaciones de Halpin-Tsai

$$\frac{E_L}{E_M} = \frac{1-2l/d \eta_L V_f}{1-\eta_L V_f} \quad \text{y} \quad \frac{E_T}{E_M} = \frac{1+2\eta_T V_f}{1-\eta_T V_f}$$

Donde

$$\eta_L = \frac{(E_f/E_M) - 1}{(E_f/E_M) - 2(l/d)} \quad \text{y} \quad \eta_T = \frac{(E_f/E_M) - 1}{(E_f/E_M) + 2}$$

Para el cálculo de la resistencia del material, se hablará a continuación de dos métodos empíricos.

El primer método empleado para calcular la resistencia a la tracción de un compuesto en el que,  $E_f^* > E_M^*$ , aplicando de una manera modificada la regla de las mezclas tenemos:

$$\sigma_r^* = K_1 K_2 \sigma_f^* V_f$$

Donde  $K_1$  es el rendimiento del esfuerzo de las fibras cortas,  $K_2$  el rendimiento de orientación y el subíndice r indica aleatorio.

En la figura 2.19 se ejemplifica un material compuesto de hojas continuas con un pequeño margen de variación de fracción volumen, considerando un valor  $\sigma_f^* = 1.8 \text{ GNm}^{-2}$ ,  $K_1 = 0.8$  y  $K_2 = 0.375$ . La dificultad que se presenta en el establecimiento de los valores de estos parámetros en la práctica, provoca limitaciones en el uso de la ecuación para el cálculo de la resistencia de sistemas desconocidos.

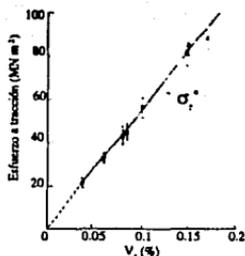


FIG 2.19 Variación de la resistencia a tracción con  $V_f$  para una hoja de moldeo continuo de poliéster y fibra de vidrio

El segundo método para un material de disposición aleatoria, considera un apilamiento de láminas unidireccionales infinitamente delgadas unidas entre sí, con una distribución angular aleatoria, donde la resistencia de cada lámina se da por el criterio del máximo esfuerzo de tal forma que:

$$\sigma_{\theta} = K_1 \sigma_{11}^* / \cos 2\theta \quad (\text{Ruptura de la fibra})$$

$$\sigma_{\theta} = \tau_{\#}^* / \sin \theta \cos \theta \quad (\text{Ruptura a cortante})$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_T^* / \sin \theta \quad (\text{Ruptura transversal})$$

Donde  $K_1$  es el factor de rendimiento de resistencia para la longitud de la fibra,  $\tau_{\#}^*$  y  $\sigma_T^*$  no son afectados por la longitud de la fibra.

Consecuentemente la resistencia del material orientado al azar, es obtenida promediando la resistencia fuera de los ejes para los intervalos de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , considerando que la deformación de ruptura final es la misma en todo el material. La ecuación resultante (Chen, 1971) es:

$$\sigma_r^* = \frac{2\tau_{\#}^*}{\pi} \left[ 2 + \text{Ln} \left[ \frac{K_1 \sigma_{11}^* \sigma_T^*}{\tau_{\#}^{*2}} \right] \right]$$

Conforme varía  $V_f$ , se observa el efecto sobre las propiedades de las láminas en forma individual.

En forma general es difícil la aplicación de estos métodos, por que es necesario tener datos sobre las resistencias y deformaciones de las láminas unidireccionales para un intervalo de ángulos fuera de los ejes en función de  $V_f$  y la longitud de las fibras.

Habrá que considerar que los materiales en disposición plana y al azar son isotrópicos en el plano de las fibras, y que al controlar la orientación de la fibra, se pueden diseñar las propiedades específicas de resistencia dentro del material.

#### B.1) Compuestos fibrosos y modos de fractura

Generalmente las propiedades de los compuestos se ven afectadas por las imperfecciones introducidas durante la manufactura y/o el servicio. Los compuestos dependen de la combinación de resistencia a la tensión de la fibra y la matriz y la resistencia última a cortante de la matriz. Ambas resistencias de la fibra y la matriz presentan cantidades gobernadas por las propiedades de flujo plástico de cada material, donde cada uno muestra un mínimo de variación.

Los compuestos hechos con fibras de longitud finita y alta fragilidad en una matriz dúctil se comportan en forma compleja, y al menos dos modos de falla se observan. La fractura de los compuestos resulta de la primera fibra fracturada o el desgarrado de varias fibras rotas y/o de la longitud finita.

En el primer modo se sugiere que la fractura de la primera fibra sobrecarga las fibras restantes en esa sección transversal y la elongación compuesta es comparable con la elongación de la fibra.

El segundo modo de fractura indica una débil unión fibra-matriz, una matriz debilitada y/o imperfecciones resultantes de la fabricación.

Para dar un criterio doble de fractura, el compuesto describe un comportamiento por la resistencia promedio de las fibras y una conducta por el análisis estático del paquete.

## **B.2) Conducta por la resistencia promedio de las fibras**

Aquí se analiza la conducta a la tensión, la resistencia y falla de modelos compuestos conteniendo fibras que muestran una uniforme resistencia a la tensión. Se sugieren los siguientes cuatro estados de los compuestos, en base a la curva esfuerzo-deformación.

- 1.- Deformación elástica de las fibras y la matriz
- 2.- Deformación elástica de las fibras, pero deformación plástica de la matriz
- 3.- Deformación plástica de las fibras y la matriz
- 4.- Deformación plástica adicional acompañada por la falla de las fibras, lo que resulta en la fractura del compuesto cuando la acumulación es suficiente.

Los cuatro estados se desarrollan si la matriz y la fibra se deforman plásticamente. Si las fibras son frágiles, el estado (3) y el (4) son muy limitados.

Se considera que los compuestos pueden diferir de un compuesto ideal en las formas siguientes:

- a) La resistencia de las fibras se degrada en los procesos de fabricación de los compuestos debido a la temperatura, el contacto con otras fibras y la matriz o simplemente como un resultado del manejo.
- b) Las fibras y la matriz interactúan químicamente para formar un tercer componente que puede influenciar la conducta del compuesto a causa de su fragilidad y/o debilidad.
- c) Como un resultado de las condiciones de fabricación y la relativa energía superficial de las fibras y la matriz, se impide el mojado, la propagación de la matriz y la adhesión de las fibras.

- d) La estructura de la matriz es influenciada por la superficie de la fibra a la cual esta unida, lo que altera su comportamiento, comparado con la conducta volumétrica de la matriz.
- e) El método de infiltración o propagación de la matriz alrededor de las fibras conduce a defectos, áreas débiles y vacíos en la matriz.
- f) El servicio en pruebas normales, incluyendo esfuerzos puede atacar uno o ambos constituyentes, causando degradación progresiva de las propiedades de los constituyentes, o la unión fibra-matriz. Cada una de estas desviaciones de un compuesto ideal destruye la conducta estructural de los compuestos y conduce a fallas progresivas por extensión de grietas, la separación de flujos plásticos o posiblemente una combinación de ambos.

Por ejemplo, para compuestos de fibra de vidrio y matriz epóxica presentan problemas las condiciones a, c, d, e y f. Finalmente las fibras son usadas para reducir los efectos de a, c y f, aunque al final puedan agravarse d y e. Para compuestos de fibra metálica, b es el mayor problema, aunque c se observa y f puede ser importante para un servicio a temperaturas elevadas por períodos largos. Para compuestos de matriz metálica con fibras cerámicas (c), usualmente requiere que las fibras sean precubiertas, siendo un proceso que ha causado las dificultades descritas en e.

### B.3) Acumulación estática de fibras fracturadas

Este análisis de fractura considera una gran dispersión en las resistencias de las fibras, aunque algunas fibras se fracturan a bajos esfuerzos. El concepto de una longitud no efectiva de la fibra es requerida aun cuando las fibras inicialmente pueden ser continuas. Rosen propone que los compuestos se pueden ver conceptualmente formados por un número de pequeñas longitudes de compuesto. Independientemente de las "Cadenas Compuestas" conectadas en serie cada una, con una longitud igual a la longitud no efectiva.

La fractura de un compuesto es asociada con la fractura de una de las cadenas. La resistencia a la tensión del compuesto es estimada como la resistencia de un paquete de fibras con una longitud igual a la longitud no efectiva (menor a  $l_c$ ) de la fibra.

#### **B.4) Comportamiento y modos de fractura bajo compresión, cortante o carga de flexión**

El conocimiento del comportamiento de la fractura de compuestos sujetos a cargas de tensión están limitadas para compuestos de filamentos continuos hechos con fibra de vidrio y, más recientemente, con fibras de boro con matriz polímera altamente termoestable.

Observando la conducta de fractura de compuestos de filamentos paralelos bajo compresión, corte y carga de flexión, estos tipos de carga muestran diversos modos de falla: flexión elástica general, flexión local, extensión de grietas paralelas a las fibras y a la capa de laminación.

La flexión elástica general, es un problema de estabilidad elástica, mientras que los otros tres modos de falla involucran propagación de grietas que inducen a la fractura. Bajo carga compresiva no son claros los modos de falla antes citados.

#### **B.5) Extensión de grietas en compuestos fibrosos por combinación de tensiones, cortante y carga a la compresión**

Las grietas a lo largo de las fibras en un compuesto de filamentos paralelos puede ser el resultado de diversas causas, como el proceso de fabricación, en el cuál la impregnación incompleta de la resina permite aumentar vacíos entre las fibras, pobre mojado y unión de la matriz a las fibras, que permite la separación a bajos esfuerzos provocando fractura temprana de las fibras causando altos esfuerzos cortantes a los extremos de las fibras rotas e induciendo la separación de la unión fibra-matriz, así como la humedad inducida la degrada, o la combinación de estos factores.

Parece ser que la extensión de grietas paralelas a las fibras es uno de los problemas más comunes con estructuras compuestas, aun cuando los esfuerzos son mantenidos dentro del rango de trabajo o diseño. Las "pequeñas grietas" desarrolladas a bajos esfuerzos en servicio y durante éstos, se presenta en un largo periodo debilitando la eficiencia de la estructura e induciendo a la degradación de ésta, particularmente en la presencia de humedad.

Tomando en cuenta lo antes expuesto se debe considerar que cuando las fibras de longitudes menores a la crítica son empleadas, el reforzamiento no puede ser completamente efectivo y el reforzamiento particulado comienza a operar.

### C. Procesos de fabricación

A continuación se da un resumen de los principales procedimientos de fabricación de productos plásticos reforzados con fibras.

#### C.1) Procesos en molde abierto

##### a) Método de contacto (Hand Lay Up)

Se colocan sobre el molde felpas de fibra enrollada, entretejidos y otros tejidos hechos de fibra, se impregnan con resina a brocha y, pasando un rodillo, se van colocando capas hasta lograr el espesor de diseño. El moldeado cura sin calor ni presión.

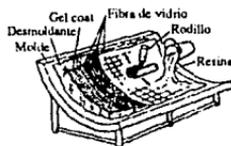


FIG 2.20 Proceso Hand Lay Up

### b) Proyección (Spray-Up)

Se proyectan simultáneamente hilos cortados y resina a un molde preparado y se pasa el rodillo antes de que la resina endurezca.

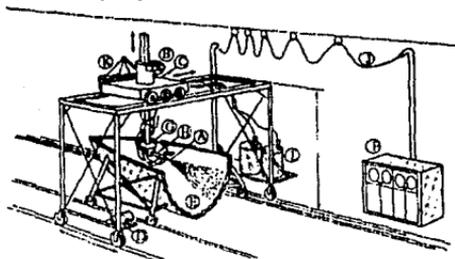


FIG 2.21 Proceso Spray Up.

A=cabeza, B= actuador vertical, C=actuador transversal, D=actuador longitudinal, E=molde parcial, F=controles, G=cabeza azimut, H=ejes de elevación, J=cables de alimentación, K=fibras, L=Depósito de resina.

### c) Saco de vacío, saco de presión, autoclave

Se preimpregnan capas de fibras, normalmente hojas unidireccionales, con resina y se curan parcialmente (estado-B) para formar un pre-impregnado. Las hojas de pre-impregnado se colocan en la superficie del molde en orientaciones determinadas, se cubren con un saco de vacío o de presión en autoclave a la temperatura de curado requerida.

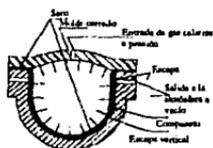
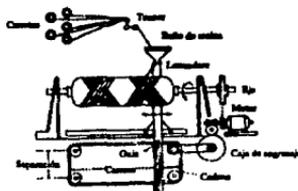


FIG 2.22 Molde de saco a presión

### d) Arrollamiento de filamentos

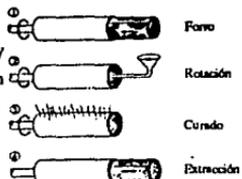
Mechas o hilos continuos de fibras se pasan sobre rodillos y guías, pasando por un baño de resina y se enrollan después, usando una máquina controlada por programa sobre un mandril con ángulos preestablecidos. La resina cura parcial o totalmente antes de sacar el componente, normalmente un tubo, del mandril.

FIG 2.23 Proceso de Hilado



e) Moldeado por centrifugación

Se introduce una mezcla de fibras y resina en un molde rotatorio y se dejan curar.



C.2) Procesos con molde cerrado

a) Moldeado a presión en caliente

Las matrices o útiles, calientes y acoplados, se cargan con materia prima (compuesto de hojas continuas SMC, PREMIX o pasta DMC) tejido o preimpregnado unidireccional y se comprime para que se adapten a la cavidad y curen.

b) Moldeado por inyección, moldeado de transferencia

Se inyectan polímeros fundidos o en estado plástico mezclados con fibras cortas, normalmente a alta presión, en la cavidad de un molde ranurado y se deja solidificar o curar.



FIG 2.24 Moldeo por centrifugación

c) Extrusión

Una alimentación continua de fibras en una orientación preseleccionada se impregna con resina y se comprime a través de un útil calentado (tréfila) para darle la forma de la sección final (ej. tubos o perfiles). Durante el paso por la matriz se produce un curado parcial o total.



FIG 2.25 Perfiles extruidos

d) Moldeado por presión en frío

Es un proceso a baja presión y baja temperatura en el que las fibras se impregnan con resina y se comprimen entre dos útiles macho y hembra.

e) Inyección de resina

Se ponen fibras en forma de tejido en el útil, el cual se cura después. Entonces se inyecta la resina a baja presión en la cavidad y fluye entre las fibras hasta llenar el espacio vacío del molde.

f) Moldeado por inyección con relación reforzada (RRIM)

Un sistema de resina de curado rápido que consta de dos componentes que se mezclan inmediatamente antes de la inyección. Las fibras se ponen en el molde cerrado antes de inyectar la resina o se añaden cortadas en trozos y desordenadas a uno de los componentes de la resina para formar una mezcla antes de la inyección.

**C.3) Métodos empleados para fabricar materiales compuestos de matriz metálica con fibras.**

Aún cuando existe una gran variedad de métodos disponibles, es necesario tener cuidado en cada método para:

- 1) Preservar la resistencia de la fibra durante todos los estados del proceso de fabricación.
- 2) Minimizar la ruptura de las fibras.
- 3) Favorecer el mojado y la unión entre la matriz y las fibras.
- 4) Obtener el empaquetamiento idóneo, espaciado y orientación de las fibras dentro de la matriz.

Diversos métodos han sido utilizados para formar compuestos con fibras y son resumidos a continuación: La matriz metálica puede estar en un estado molecular, fundido o pulverizado o en la forma de hojas delgadas para la fabricación del compuesto. Una vez que las fibras y la matriz son combinadas, otros procesos pueden ser empleados para ayudar a la consolidación de éstos.

Estado de la matriz	Método usado para combinar la matriz con la fibra	Método usado para formar y hacer el compuesto	Sistema Compuesto matriz - (fibras)
A) Fundido	Infiltración dentro paquetes paralelos de fibras	No hay trabajo adicional	Cu y Cu/Aleaciones(W)
	Infiltración dentro de materiales fibrosos	Rolado y maquinado	Al, Ag, Ni(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), Al(vidrio) Ag-(acero, Mo)
	Mezclado	Prensado en caliente	Al-(acero)
B) Polvos	Mezclado, prensado en frío	Extrusión en caliente	(Ti aleaciones Ti-Mo)
	Sinterizado	Templado	
	Mezclado, prensado	Extrusión en caliente	Al-(W)
	Mezclado, prensado en caliente	Rolado en caliente, estampado o forjado	Ni-Cr aleaciones Co
	prensado en frío y Sinterizado		Cu, acero-(W)
	Mezclado, matriz fundida	Estruido, sinterizado	Ni-Cr, Fe-(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
C) Molecular	Mezclado	rolado en frío	
	Mezclado, seco	Extruido, sinterizado	Ag-Ni-(Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )
	Electroplatinado	No hay trabajo adicional	Ni-(AlO, W)
	Electroplatinado	No hay trabajo adicional	Ni-(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
D) Cubierta de Hojas	Vapor platinado, electrodeposición, prensado en caliente	Rolado en caliente	Ni-(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
	Alterando capas de cubiertas y fibras	Union por difusión	Al- (acero) Al- (B, Be)
	Alterando capas de cubiertas y fibras	Union por difusión	Ti-aleación Ti-(B) Ti- (Be)
E) Combinación	Alterando capas de cubiertas y matas de hilos	Rolado en caliente	Al- (acero-Si)
	Hilos estruidos a través de la matriz fundida	Prensado en caliente uniendo las fibras	Al- (SiO <sub>2</sub> )
	Electroplacas de fibras	Encapsulado en latas estruido, sinterizado	Ag- (acero)

Tabla 2.5 Métodos de fabricación de compuestos con matriz metálica

En suma la preferencia del o los métodos usados para producir un material compuesto dependerá primeramente de las propiedades mecánicas y químicas de la fibra y la matriz, en la longitud y tamaño de la fibra. También en la selección de un proceso, es necesario conocer las relaciones termodinámicas entre las fases de la matriz y la fibra, y la temperatura de fabricación y servicio a la que el compuesto estará sujeto.

#### D. Aplicaciones

Industria	Ejemplos
Aeronáutica	Alas, fuselajes, tren de aterrizaje, hélices de helicópteros.
Automóviles	Piezas de la carrocería, alojamientos de los faros, parrillas, parachoques, ballestas, bastidores de los asientos, árbol de levas.
Náutica	Cascos, cubiertas, mástiles.
Química	Conducciones, recipientes de baja y alta presión.
Mobiliario y equipaje	Estantes, armazones, sillas, mesas y escaleras
Eléctrica	Panales aislantes, caja de interruptores.
Deportes	Cañas de pescar, palos de golf, piscinas, esquís, canoas.

Tabla 2.6 Aplicaciones de materiales compuestos reforzados con fibras basados en plásticos.

Fibras	Matriz	Aplicaciones Potenciales
Grafito	Aluminio	Estructura de satélites, helicópteros y de misiles.
	Magnesio	Estructuras de satélites y naves espaciales.
	Plomo	Baterías.
	Cobre	Contactos eléctricos y rodamientos.
Boro	Aluminio	Alabes de compresores y soportes estructurales.
	Magnesio	Estructuras de aviones y antenas.
	Titanio	Alabes de ventiladores de las máquinas de aviones.
B <sub>4</sub> C	Aluminio	Alabes de ventiladores de máquinas de aviones.
Alúmina	Aluminio	Superconductores en reactores nucleares.
		Estructuras sometidas a altas temperaturas.
	Plomo	Baterías.
	Magnesio	Estructuras de transmisión de helicópteros.
	Titanio	Estructuras sometidas a altas temperaturas.
	Superalcaciones (Base Co)	Componentes de máquinas sometidas a altas temperaturas.
Molibdeno	Superalcaciones	Componentes de máquinas sometidas a altas temperaturas.

Tabla 2.7 Aplicaciones potenciales de materiales compuestos con matriz de metal reforzado con fibras

## Capítulo 3

### Material reforzado con partículas

#### A. Teoría

Aunque la definición de material compuesto es satisfecha por la presencia de dos o más fases vinculadas entre sí, las microestructuras difieren grandemente y diversas características deben ser conocidas para establecer el tipo de compuesto analizado, como por ejemplo: el conocimiento de si la fase o las fases son continuas y el estado de la fase dispersa; o si dichas fases pueden ser cerámicas, metálicas o poliméricas.

Particularmente, en este trabajo se tratarán los compuestos cuya microestructura consiste de partículas de una fase, dispersas en una segunda fase, las cuales conforman dos estructuras ligadas. Dicha clase de compuestos se distinguen de los reforzados con fibras, ya que presentan dimensiones aproximadamente iguales, como pueden ser: redondas, cuadradas o triangulares. Distinguiéndose de los endurecidos por dispersión por el tamaño y el volumen de concentración del reforzamiento.

Se pueden subdividir los materiales compuestos por partículas en tres categorías generales basadas en el tamaño, forma y la composición de las partículas que influyen en las propiedades del compuesto; estas categorías son:

- 1) **Compuestos endurecidos por dispersión**
- 2) **Compuestos reforzados con partículas**
- 3) **Compuestos reforzados con hojuelas**

1) Compuestos endurecidos por dispersión

En los compuestos endurecidos por dispersión, la matriz es el principal soporte de carga. Los materiales se pueden reforzar al dispersar las partículas como fase secundaria en ellos. De este modo, los materiales que contienen partículas finamente dispersas son mucho más resistentes; esta fase puede ser metálica, intermetálica o no metálica, pero se utilizan con mayor frecuencia los óxidos debido a su resistencia, dureza y gran estabilidad térmica. Además, no debe ocurrir ninguna reacción química entre el dispersante y la matriz, por ejemplo: La alúmina no se disuelve fácilmente en el aluminio; de aquí que resulte un dispersante efectivo para las aleaciones de aluminio; sin embargo, el óxido de cobre se disuelve en el cobre a altas temperaturas, por lo que el sistema Cu-Cu<sub>2</sub>O no será efectivo.

La fina dispersión se encuentra presente para impedir el movimiento de dislocaciones en la matriz metálica, la matriz se endurecerá o reforzará en proporción a la efectividad de la dispersión como una barrera al movimiento de dislocaciones. Se puede analizar la efectividad del refuerzo por dispersión considerando el tamaño de las partículas (d), el volumen fraccionario de las partículas (V<sub>p</sub>) y la trayectoria media libre de la matriz entre las partículas (mfp). En algunos casos se utiliza el espaciamiento interparticular (D<sub>p</sub>) en lugar de la trayectoria media libre de la matriz.

$$mfp = \frac{2d}{3V_p} (1 - V_p) \dots (1)$$

$$D_p = \frac{2d^2}{3V_p} (1 - V_p) \dots (2)$$

Si el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) aplicado es suficiente, las dislocaciones de la matriz se doblarán o arquearán alrededor de las partículas (ver figura 3.1). El esfuerzo necesario para producir ese arco se obtiene de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{G_M \bar{b}}{D_p} \dots (3)$$

$\bar{b}$  = vector de dislocaciones de Burgers

$G_M$  = módulo de corte de la matriz

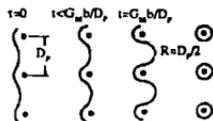


FIG 3.1 Secuencia del movimiento de dislocaciones

Entonces el efecto de incremento de la resistencia de las dispersiones de partículas se relaciona inversamente al espaciamento entre las partículas ( $D_p$ ). Por otra parte, los rizados del cristal que se deslizó, rodean a las partículas dispersas y reducen en forma efectiva las separaciones entre las partículas, haciendo que sea más difícil el movimiento de otras dislocaciones a través de las dispersiones. Por lo que se necesitan aplicar altos esfuerzos para continuar el movimiento de las dislocaciones (deslizamiento) lo que demuestra la función esencial del esfuerzo en dispersión.

La teoría de la dislocación ha sido la primera herramienta empleada para explicar y predecir la razón de arrastre de los materiales compuestos fortalecidos por dispersión, donde la razón de arrastre es igual al producto del número de dislocaciones activas por unidad de volumen, la deformación producida para llevar la dislocación justo a su radio crítico, y el rango al cual las dislocaciones enlazadas son separadas por una dislocación inicial en una unidad de tiempo.

$$\dot{\epsilon} = (M\pi D_p^2/8) \dot{b}R \dots (4)$$

donde  $R$  es la relación a la cual la dislocación de anillo es separada por una dislocación originada por unidad de tiempo,  $M$  es el número de dislocaciones activas por unidad de volumen.  $R$ , también puede ser definido como la velocidad de ascenso de dislocaciones dividida por el diámetro de la partícula.

$$R = v/d$$

### 1.1) Consideraciones en la selección del dispersante

Las propiedades de los compuestos endurecidos por dispersión se pueden optimizar si se consideran los siguientes aspectos:

- La fase dispersa, por lo común un óxido duro y estable debe ser un obstáculo efectivo para el deslizamiento de las dislocaciones.
- El material disperso debe tener un tamaño, forma, distribución y cantidad óptimos.

$m_f/p =$	0.3	-	0.01 $\mu$
$D_p =$	0.3	-	0.01 $\mu$
$V_p =$	0.01	-	0.15
$d$			$< 0.1 \mu$

- El material disperso debe tener una baja solubilidad en la matriz.
- Se debe lograr una buena unión entre el material disperso y la matriz. Una pequeña solubilidad del dispersante en la matriz puede servir para producir una unión firme.

Los materiales fortalecidos por dispersión a temperaturas normales, no resultan más resistentes que las aleaciones metálicas de dos fases. Sin embargo, los compuestos endurecidos por dispersión no se ablandan catastróficamente debido al sobre-envejecimiento y sobrevenido, el crecimiento de grano o engrosamiento de la fase dispersa y la resistencia del compuesto disminuyen gradualmente conforme se incrementa la temperatura (ver figura 3.2). No obstante, la resistencia a la termofluencia es superior a la de los metales y aleaciones.

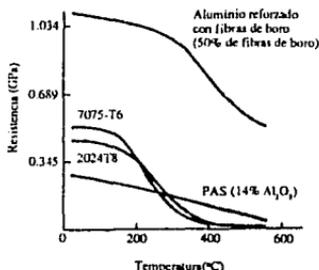


FIG 3.2 Comparación de resistencia entre polvo de aluminio sinterizado y aleaciones de aluminio

## 2) Compuestos reforzados con partículas

Los compuestos reforzados con partículas, duras y frágiles, dispersas de una manera discreta y uniforme, se rodean por una matriz más blanda y dúctil. Dicha estructura hace recordar la de muchas aleaciones metálicas de dos fases endurecidas por dispersión. Sin embargo, en estos compuestos no se utiliza una transformación de fase para introducir las partículas dispersas, sino un proceso mecánico. Los compuestos con partículas son muchas veces divididos en subclases usando algunas características en base a la conducta de las partículas bajo carga, de las cuales se hablará más adelante. Estas categorías de compuestos no incluyen partículas achatadas en la superficie, las cuales poseen diferentes propiedades suficientes para garantizar una clasificación especial.

Estos compuestos contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no obstaculizan de manera efectiva el deslizamiento. Los compuestos con partículas incluyen combinaciones poco frecuentes de propiedades y no siempre para mejorar la resistencia.

Microestructuralmente, los compuestos reforzados con partículas continúan donde los materiales compuestos fortalecidos por dispersión exceden el 25% del dispersor, y el diámetro de la partícula y la trayectoria media libre excede 1 micra.

El fortalecimiento de los compuestos reforzados por partículas ocurre cuando las partículas dispersadas restringen la deformación de la matriz como una traba mecánica. La magnitud de la traba es desconocida y compleja, pero es una función de la relación diámetro-espaciamento interparticular, así como la relación de las propiedades elásticas de la matriz y las partículas. En general, los módulos elásticos del compuesto caen bajo la "regla de las mezclas".

$$\text{Valor superior } E_C = V_M E_M + V_P E_P \dots (5)$$

$$\text{Valor inferior } E_C = \frac{E_M E_P}{V_M E_P + V_P E_M} \dots (6)$$

En estudios hechos más allá del rango elástico, se ha encontrado que bajo carga, el esfuerzo cortante interno ( $\tau_i$ ), es igual al número de dislocaciones de anillos apilados encima y junto a las partículas por el esfuerzo aplicado.

$$\tau_i = n\sigma \quad \dots (7)$$

donde n es el número de anillos en el apilamiento, relacionado al espaciamiento interparticular por:

$$n = \sigma D_p / G_M b \quad \dots (8)$$

y al ser substituida nos queda

$$\tau_i = \sigma^2 D_p / G_M b \quad \dots (9)$$

Si el esfuerzo cortante interno es equivalente a su esfuerzo de fractura, las partículas fracturarán nucleando una grieta, la que causará la cedencia del compuesto.

$$\text{(cedencia)} \quad \tau_i = \sigma_{FP} = G_p / C = \sigma^2 D_p / G_M b \quad \dots (10)$$

y donde C es la constante denotando la resistencia del material.

$$\sigma_{Cy} = (G_M G_p b / C D_p)^{1/2} \quad \dots (11)$$

## 2.1) Propiedades de los compuestos con partículas bajo carga

Con el conocimiento de si las partículas se deforman o no bajo carga, se pueden hacer fáciles predicciones en base a la concentración volumétrica del dispersor en: el módulo elástico, resistencia a la cedencia, resistencia última a la tensión y alargamiento de fractura.

### 2.1.1) Compuestos con partículas en los cuales, los dispersores se deforman bajo carga

Cuando un compuesto con partículas en bifase es deformado bajo carga, la fase matriz (usualmente más blanda que el reforzamiento con partículas) tiende a deformarse ante esfuerzos menores que las partículas dispersas en la matriz. Esta deformación de la matriz está relacionada al esfuerzo aplicado por:

$$\epsilon_z = (1/E)[\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \dots (12)$$

donde:

$\epsilon_z$  = deformación de la matriz en la dirección z (dirección de la carga)

$\sigma_z$  = esfuerzo de la matriz en la dirección z

$\sigma_x$  = esfuerzo de la matriz en la dirección x

$\sigma_y$  = esfuerzo de la matriz en la dirección y

$\mu$  = coeficiente de Poisson en la matriz

E = módulo elástico de la matriz (supuesto isotrópico)

Ya que la matriz se encuentra unida rígidamente a las partículas duras, la deformación es restringida, de la misma manera que si se encontrara la partícula sola. De ahí que la restricción a la deformación de la matriz, impuesta por las partículas de reforzamiento, resulta en un estado hidrostático de esfuerzo generado en la matriz.

La magnitud de la resistencia hidrostática y la determinación de si el esfuerzo generado es completamente hidrostático, depende las propiedades elásticas relativas de las dos fases (módulo elástico y coeficiente de Poisson) y la trayectoria media libre de la matriz.

Para el caso de una presión hidrostática pura,  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$  y si se sustituye  $\mu = 1/3$ , la ecuación (12) se simplifica quedando:

$$\sigma_z / \epsilon_z = 3E \dots (13)$$

Mostrando que la matriz en presión hidrostática pura, presenta un módulo elástico del compuesto tres veces mayor que el valor pronosticado por la regla de las mezclas. Y siendo mostrado por el sistema tungsteno-níquel-hierro.

En los compuestos deformables la curva completa de flujo es dependiente y gobernada por las propiedades de la fase dispersa. Por esto el esfuerzo de flujo, la relación de endurecimiento por el trabajo, y la deformación última son independientes del volumen de concentración del reforzamiento.

La dependencia de estas propiedades a la temperatura es típica de la fase dispersa, mostrando una vez más que el dispersoide controla la deformación.

#### 2.1.1.A) Fractura

La fractura en los compuestos con partículas deformables iniciada en la interfase partícula-matriz, se propaga desde la superficie de la fase matriz, a la superficie de separación cercana, donde el proceso se repite.

La fractura de superficie es típica de una fractura dúctil, en base a un alto grado de trabajo plástico en la matriz.

#### 2.1.1.B) Conducta a temperaturas elevadas

En realidad es muy poco el trabajo realizado en el estudio de las propiedades de los compuestos con partículas arriba o abajo de la temperatura ambiente. En general la conducta de los compuestos con partículas deformables a elevadas temperaturas puede ser pronosticada por los principios antes descritos.

La ductilidad compuesta, bajo temperaturas elevadas, se ve reducida por diversas razones, siendo la principal la reducción inherente de las fases individuales, ya que la mayoría de los compuestos deformables se encuentran formados de partículas cúbicas de cuerpo centrado, en una matriz cúbica de cara centrada, al evaluar las fuerzas hidrostáticas, se observa que la resistencia a la cedencia del dispersoide es mucho mayor que la de la matriz.

Al bajar la temperatura el compuesto se vuelve frágil por la diferencia entre las fuerzas de las dos fases. Un poco arriba de la temperatura ambiente, la ductilidad del compuesto aumenta por el ascenso de la ductilidad en las fases individuales, y la ductilidad aumenta progresivamente con el ascenso de la temperatura. Pero a una alta temperatura, aunque la ductilidad aumenta, las partículas contribuyen progresivamente menos a la ductilidad, ya que la matriz se vuelve más débil con el aumento de la temperatura y se deforma más que las partículas, que no pueden continuar deformándose. De aquí que la tensión disminuya con el aumento de la temperatura y el control de la deformación del compuesto cambie de las partículas a la matriz.

2.1.2) Compuestos con partículas en los cuales la fase dispersa no se deforma bajo carga.

Para cualquiera de las clases de compuestos con partículas en las que el dispersoide no se deforma antes de la fractura bajo carga aplicada, la fase particulada queda esencialmente rígida, dando fuerza al compuesto, pero bajando drásticamente la ductilidad por debajo de la que presenta la matriz sola.

En estos compuestos frecuentemente el dispersoide es utilizado para otros propósitos que la resistencia, por ejemplo: resistencia al desgaste, a la oxidación, aislamiento y resistencia a la humedad en herramientas de corte.

#### 2.1.2.A) Módulo elástico

La diferencia entre dureza y resistencia en los compuestos indeformables, previene que el factor de coacción hidrostático se extienda tanto como pueda en los compuestos deformables. Las fases duras- carburos, óxidos e intermetálicos -son generalmente materiales frágiles que muestran alargamiento cero bajo tensión uniaxial. De aquí que los compuestos indeformables caigan en los límites de isodeformación e isoefuerzos.

En ningún caso ha sido superado el límite superior del módulo elástico. En caso de que el valor del módulo cayera ligeramente arriba del límite inferior, mostraría que alguna restricción y endurecimiento de la matriz esta presente.

Los módulos de los compuestos con partículas pueden ser calculados, basándose en las ecuaciones desarrolladas por Hashin y Shtrikmon:

Limite inferior:

$$E_1^* = \frac{9 \left[ \frac{K_M + \frac{V_P}{1 + \frac{3V_M}{K_P - K_M}}}{3K_M + 4G_M} \right] G_M + \frac{V_P}{G_M - G_P} \frac{1 + \frac{6(k_M + 2G_M)V_M}{5(3K_M + 4G_M)G_M}}{5(3K_M + 4G_M)G_M}}{3 \left[ \frac{K_M + \frac{V_P}{1 + \frac{3V_M}{K_P - K_M}}}{3K_M + 4G_M} \right] + \frac{G_M + \frac{V_P}{G_M - G_P} \frac{1 + \frac{6(k_M + 2G_M)V_M}{5(3K_M + 4G_M)G_M}}{5(3K_M + 4G_M)G_M}}{5(3K_M + 4G_M)G_M}}$$

Limite superior:

$$E_2^* = \frac{9 \left[ \frac{K_P + \frac{V_M}{1 + \frac{3V_P}{K_M - K_P}}}{3K_P + 4G_P} \right] G_P + \frac{V_M}{G_M - G_P} \frac{1 + \frac{6(k_P + 2G_P)V_P}{5(3K_P + 4G_P)G_P}}{5(3K_P + 4G_P)G_P}}{3 \left[ \frac{K_P + \frac{V_M}{1 + \frac{3V_P}{K_M - K_P}}}{3K_P + 4G_P} \right] + \frac{G_P + \frac{V_M}{G_M - G_P} \frac{1 + \frac{6(k_P + 2G_P)V_P}{5(3K_P + 4G_P)G_P}}{5(3K_P + 4G_P)G_P}}{5(3K_P + 4G_P)G_P}}$$

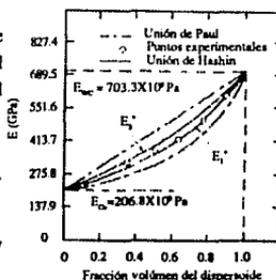
donde:

$E_1^*$ : Valor límite inferior del módulo elástico de un compuesto de dos fases, donde el módulo del material 2 es mayor que el del material 1.

$E_2^*$ : Valor límite superior del módulo elástico.

Estos módulos se muestran en la figura 3.3 y los presenta el sistema WC-Co.

FIG 3.3 Módulos elásticos de WC-Co en función de la fracción de volúmen



### 2.1.2.B) Propiedades de flujo de compuestos no deformables

En general el alargamiento a fractura es menor en un pequeño porcentaje de compuestos no deformables y son clasificados como materiales frágiles y de baja resistencia al impacto.

La imposibilidad del reforzamiento con partículas, a ser deformado bajo carga, resulta en función de las propiedades mecánicas del volumen de concentración del reforzamiento así como la separación media libre de la matriz. Las propiedades que muestran el efecto del porcentaje de volumen de partículas son: la densidad, el coeficiente de expansión térmica, la dureza, el límite proporcional a compresión y la resistencia a la tensión, por ejemplo, en la figura 3.4 se observa la variación de la resistencia a la tensión del sistema Tungsteno-cobre.

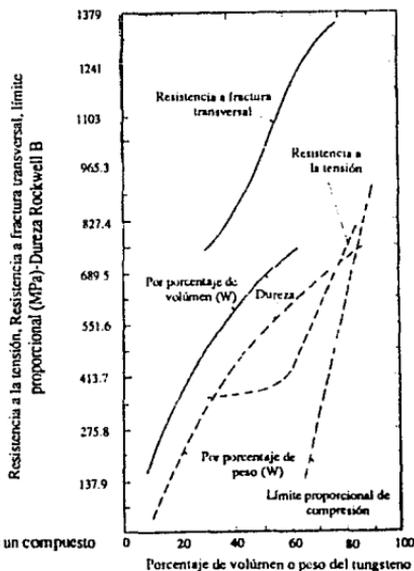


FIG 3.4 Propiedades Mecánicas de un compuesto Cobre-Tungsteno

**ESTA TESTS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

De los datos obtenidos en materiales Cermets, Unckel, concluyó que la resistencia disminuye con el logaritmo de la separación media libre de la matriz, siguiendo la relación de Gensamer. Aunque esta relación es ampliamente aceptada a excepción del sistema WC-Co, donde esfuerzos máximos son observados a una pequeña separación interparticular ( $1\mu$ ). Estos efectos son causados probablemente por la continuidad de las partículas y realmente no violan la dependencia de Unckel y Gensamer.

#### 2.1.2.B.1) Fractura

La línea de fractura en los materiales tipo Cermet, es afectada por las características de la microestructura. En los materiales cermet verdaderamente dispersos, las fracturas inician entre la matriz misma, ya que llega a un nivel máximo de esfuerzo al cual puede ser forzada y una grieta es abierta en ella, la fractura se inicia en la superficie de la interfase partícula-matriz.

La línea de la fractura se determina por la microestructura (determinada por la relación entre las fases). Por ejemplo: Si la fusión líquida presente en la temperatura de sinterización, moja completamente y rodea la fase sólida, se obtiene una microestructura completamente dispersada. Por otra parte si no existe un mojado ideal en el sistema, ocurrirá un aumento considerable de la partícula, debido a la incapacidad del líquido para penetrar la masa sólida de la misma. Resultando en un aumento considerable de la partícula y la presencia de límites sinterizados débiles que sirven como lugares de inicio de la fractura.

#### 2.1.2.B.2) Conducta a temperaturas elevadas

Las propiedades de los materiales tipo cermet decaen en forma regular, con el aumento de temperatura. En las figuras 3.5-7 se muestran datos de las variaciones de dureza, módulo de Young, resistencia al arrastre y resistencia a la ruptura con temperaturas de prueba.

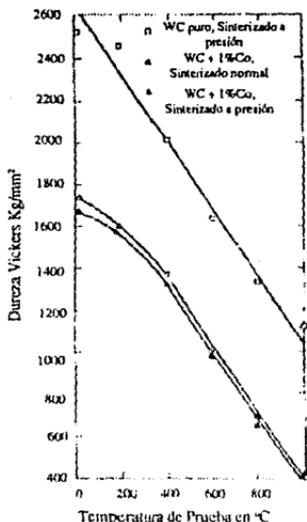


FIG 3.5 Propiedades mecánicas del tungsteno-cobre

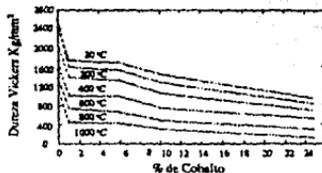


FIG 3.6 Variación de la dureza a diferentes temperaturas del WC-Co

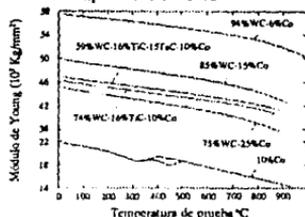


FIG 3.7 Variación del módulo de Young con respecto a la temperatura

### 3) Compuestos reforzados con hojuelas

Las hojuelas o plaquetas representan una clase especial de reforzamiento como relleno de los termoplásticos y termofijos. Las hojuelas más comunes "comercialmente" hablando son la muscovita, la flogopita y la biotita. La mayoría de las hojuelas son de aluminio y silicato de potasio, con diversas proporciones de magnesio, hierro, litio, "fluorina" dependiendo de la fuente de procedencia.

Aunque han sido utilizadas anteriormente como relleno barato (por combinar alta rigidez con buenas propiedades dieléctricas), es reciente su desarrollo como reforzamiento gracias a que son delaminadas las hojuelas en la manufactura de papel reconstituido, ya que la mayoría de las resinas termofijas y termoplásticas presentan un alto nivel de reforzamiento debido a la alta razón que guarda el diámetro con el espesor.

En altas concentraciones de volumen, la hojuela reforzadora del compuesto tiene un módulo igual al aluminio y valores de esfuerzos altos, por lo que, altas razones de hojuela pueden ser empleadas como parte o reemplazo total de agentes reforzadores caros como las fibras cortas de asbesto.

Varias relaciones se han propuesto para poder calcular el módulo y la resistencia del compuesto con hojuelas, tomando como base las propiedades de los compuestos individuales. Si se considera que las hojuelas consisten de una tira rectangular de igual medida, depositadas en un perfecto traslape paralelo, la situación es similar a los compuestos reforzados con fibras y el módulo se puede estimar a través de la regla de las mezclas de acuerdo a la siguiente relación:

$$E_Y = KE_1V_1 + E_2V_2$$

donde  $E_Y$  es el módulo de Young paralelo a la orientación de tiras y  $K$  se aproxima a 1 para tiras largas, con grandes áreas traslapadas.  $E_1$  y  $E_2$  son los módulos de la hojuela y la matriz respectivamente,  $V_1$  y  $V_2$  las fracciones volumétricas de cada componente, tal que,  $V_1 + V_2 = 1$ . Si las tiras son relativamente cortas el valor de  $K$  será menor que 1.

Aplicando la teoría desarrollada por Cox para fibras cortas y apoyándose en la ecuación modificada de la regla de las mezclas utilizada por Padawer y Beecher para predecir el módulo de compuestos con fibras cortas en forma uniforme, el valor de  $K$  se calcula como sigue:

$$K = 1 - \frac{\tanh u}{u}$$

y

$$u = \alpha \frac{G_2 V_1}{E_1 V_2}^{1/2}$$

Los subíndices 1 y 2 se refieren al reforzamiento y a la matriz respectivamente,  $G_2$  es el módulo a cortante de la resina y  $\alpha$  la razón de la hojuela (diámetro/espesor). La dureza del compuesto está en función de la proporción de la hojuela, el módulo a cortante de la resina, al igual que la fracción volumétrica de la hojuela.

Quando la hojuela se traslapa en forma aleatoria (comunmente en sistemas altamente rellenos) la teoría de Padawer y Beecher tiende a sobrestimar los resultados experimentales. Por lo que Riley ha desarrollado la siguiente expresión para el caso aleatorio, donde K incluye el efecto secundario con la interacción de las hojuelas.

$$K = 1 - \frac{\ln(u+1)}{u}$$

La resistencia a la tensión relacionando también la razón de la hojuela, con la regla de las mezclas modificada por Piggett es obtenida como sigue:

$$\sigma_x = K' \sigma_1 \left( 1 - \frac{\sigma_1}{6\alpha\tau_2} \right) V_1 + \sigma_2' V$$

donde:  $\sigma_x$  es la resistencia última a la tensión en la dirección de alineación,  $\sigma_1$  y  $\sigma_2'$  son las resistencias a la tensión del reforzamiento y la matriz, esforzados a fractura,  $\tau_2$  es la resistencia a cortante de la matriz y  $\alpha$  es el promedio de la razón de la hojuela. El valor de  $K'$  depende del arreglo de empaquetamiento, variando de 1/2 (arreglos de sistemas metálicos) a 2/3 (arreglo escalonado). Para el acomodamiento aleatorio de hojuelas paralelas, el valor de  $K'$  se encuentra experimentalmente.

Las relaciones teóricas para el cálculo del esfuerzo y la resistencia, indican un alto grado potencial de disponibilidad de la hojuela, si se toma en cuenta que habrá que tener el cuidado de mantener relaciones altas (diámetro/espesor) y buen alineamiento en el moldeo. Las técnicas para lograr esta meta todavía se encuentran en desarrollo.

Para la elaboración de las hojuelas, considerando su estructura cristalina, como una capa individual de silicato se pueden reducir fácilmente a finas hojuelas por tratamientos físicos o químicos. Comercialmente los métodos de delaminación se caracterizan como "húmedos" o "secos". Debido a que la molienda por el método húmedo involucra un fluido, el cual es removido al final resultando un proceso caro; sin embargo por medio de este método se preserva el brillo natural y el lustre de la hojuela por lo que se puede utilizar para aplicaciones especiales donde esta característica es deseada, como en la elaboración

de pinturas, papel tapiz, goma, plásticos, telas, y otros. Caracterizándose normalmente por el limpiado y corte de orillas, alta razón, superficies suaves y la facilidad de dispersión en un líquido. Por otra parte, el proceso en seco se caracteriza por ser áspero con superficies abrasivas, orillas filosas y propiedades pobres de mezclado.

En la molienda mecánica se producen hojuelas de diversos tamaños y formas, las cuales deben ser fraccionadas con el fin de obtener altos grados de proporción, como los que se muestran en la figura 3.8.



FIG 3.8 Fotografía de hojuelas mostrando superficies irregulares

La molienda en seco se lleva a cabo a altas velocidades en un compartimiento equipado con pantallas y separadores de aire. La hojuela se selecciona de acuerdo al tipo de malla de múltiples pantallas vibratorias. Estas hojuelas son empleadas en techos y en aceites de corte; donde la extrema fineza, buen color y lustre no son tan importantes.

Para obtener valores satisfactorios en la relación del diámetro y espesor promedios, se necesitará al menos una muestra de 100 hojuelas, ya que es difícil medir el diámetro y el espesor de cada hojuela, por lo que el promedio es dado por:

$$\bar{\alpha} = \bar{D}/\bar{\epsilon}$$

donde  $\bar{\alpha}$  es el promedio de la razón,  $\bar{D}$  es el diámetro promedio y  $\bar{\epsilon}$  el espesor promedio.

Para hojuelas relativamente grandes, la determinación del diámetro en forma directa puede ser estimada visualmente empleando un microscopio o un calibrador de círculos concéntricos de retícula de diferentes diámetros. En otros casos las hojuelas de grandes dimensiones se pueden medir usando una cuadrícula para determinar el área total cubierta por un número conocido de hojuelas.

El espesor también puede ser determinado a través del microscopio, pero con un error del 12% al 18% debido al poder de resolución. Maine y Shepherd emplean una microbalanza para pesar una muestra de hojuelas, la cual es depositada en una malla microporosa. Y usando el método de puntos, se determina el área total cubierta por las hojuelas y el espesor puede ser calculado de la densidad conocida de la mica. Como se observa, esta técnica de determinación de la proporción promedio es extremadamente tediosa y tardada. Por lo que para minimizar el error y reducir el trabajo es mejor un contador automático de tamaño de partícula.

### 3.1) Propiedades

La mayoría de las hojuelas cristalizan en un sistema monoclinico, caracterizándose por la cercanía perfecta en carga basal la cual permite grandes cristales en forma de "libros", que se deslizan en hojuelas extremadamente delgadas de alta flexibilidad y resistencia elástica.

Se le ha dado el nombre de hojuela a todas las clases de silicatos de aluminio de la familia de los "filosilicatos". Estos minerales se pueden clasificar en cuatro tipos principales los cuales son: La muscovita, la flogopita, la biotita y la lapidolita, donde las dos primeras son de mayor uso comercial. Aun cuando la composición química precisa varía, dependiendo de la muestra original, las fórmulas aproximadas se muestran a continuación:

Muscovita	$K_2Al_4CaAl_2Si_6O_{20}(OH)_4$
Flogopita	$K_2(MgFe^{+2})_6(Al_2Si_6O_{20})(OH,F)_4$
Biotita	$K_2(MgFe^{+2})_6(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$
Lapidolita	$K_2Li_4Al_2(Si_6O_{20})(F,OH)_4$
Zinnwaldita	$K_2Li_2Fe_2Al_2(Al_2Si_6O_{20})(F,OH)_4$
Paragonita	$Na_2Al_4(Al_2Si_6O_{20})(OH)_4$
Fluoroflogopita (sintética)	$K_2Mg_6Al_2Si_6O_{20}F$

Como se puede observar en la figura 3.9, la estructura de la hojuela está constituida con una estructura tetraédrica de siloxano (silicio y oxígeno), además hay capas de aluminio e hidróxido en forma octaédrica, entre dos capas de siloxano, en forma de sandwich. Estas tres capas se encuentran unidas, a otras capas semejantes arriba y abajo, por medio de cationes como: el potasio que posee 12 dobles que concuerdan con el litio, sodio o calcio. Cada capa triple tiene un espesor aproximado de 10 Å. El color generalmente es debido a la presencia de impurezas o de hierro, la composición química de tres hojuelas comerciales se muestra en la tabla

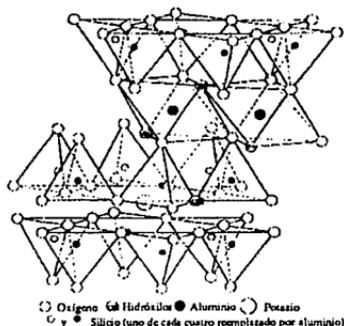


FIG 3.9 Estructura Cristalina de la Muscovita

3.1. La dureza de la hojuela en base a la escala de Mosh es baja y fluctúa de 2.5 a 4.0, por lo que el equipo de proceso en la abrasión del acero es menor comparado con los plásticos rellenos de virio, la gravedad específica varía de 2.75 a 3.2.

	Flogopita <sup>a</sup> [%peso]	Muscovita <sup>b</sup> [%peso]	Muscovita <sup>c</sup> [%peso]
SiO <sub>2</sub>	40.74	47.90	48.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.76	33.13	31.55
MgO	20.56	0.69	1.99
FeO	7.83	-	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.21	2.04	2.20
K <sub>2</sub> O	9.96	9.80	7.86
Na <sub>2</sub> O	0.46	0.80	1.20
BaO	0.45	-	-
CaO	<0.01	0.50	1.25
TiO <sub>2</sub>	0.42	0.65	1.04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.14	-	-
MnO	0.07	0.01	0.01
F	2.16	-	-
P	-	.03	-
S	-	.01	-
H <sub>2</sub> O+ (combinado)	1.01	4.30	4.20
H <sub>2</sub> O-[libre]	0.01	0.10	0.10

a) Variedad Suzonite, Maricopa Resources International Ltd.

b) The English Mica Co.

c) Whitaker, Clark and Daniels, Inc.

Tabla 3.1 Análisis químico de hojuelas comerciales de la flogopita y la muscovita.

Las características generales de las hojuelas son: resistencia al ambiente, resistencia química, conductividad térmica baja y prolongada, estabilidad a altas temperaturas. Un problema que se presenta en el manejo de la hojuela (<10µ de diámetro), es la toxicidad por ser ligeras, flotar en el aire y ser inhalables, habrá que tomar precauciones, como si se tratara de partículas finas de silicato y trabajarse en áreas bien ventiladas. Para hojuelas de 100 mallas o mayores ésto ya no es problema, por no poderse inhalar.

## **B. Procesos de manufactura**

### **B.1) Impregnación**

Es el método más simple para preparar el estado coloidal del compuesto de estructuras continuas, en este método, un compactado en verde de metal o polvos de óxidos comprimidos son elaborados en frío o en caliente. Al ser preparado así es lo suficientemente fuerte para manejarse, presentando una limitada resistencia mecánica y constituirse con valores del 30% al 50% de vacíos.

Este compactado es entonces puesto en un horno en contacto con el impregnante y se calienta por encima del punto de fusión del impregnante (el cual debe ser por debajo del punto de fusión de la estructura). Para obtener una impregnación óptima y completa, el líquido infiltrante y la estructura sólida deben ser mutuamente insolubles y las energías de superficie deben ser de un mojado ideal (ángulo de contacto cero). En el caso de que el líquido infiltrante disuelva la estructura o sea soluble en ésta, la impregnación será incompleta debido a la erosión de la estructura o a un enfriamiento temprano. En ambos casos, el compuesto resultante será poroso con una resistencia más baja que un compuesto completamente denso. En el caso de que el ángulo de mojado del infiltrante fundido en la estructura, sea mayor de 30 grados, ocurrirá una impregnación incompleta, resultando también una estructura porosa.

Ejemplos de materiales así obtenidos son los siguientes: tungsteno-cobre, tungsteno-plata, molibdeno-cobre, molibdeno-plata y níquel-plata. Estos compuestos muestran: resistencia al desgaste, resistencia a la alta temperatura, resistencia a la erosión de los refractarios de tungsteno y molibdeno, con una buena conductividad eléctrica, conductividad térmica y propiedades de ablación del cobre y plata.

### B.2) Sinterización del estado sólido

Los compuestos particulados preparados por sinterización del estado sólido, están formados de dos o más materiales, que pueden o no alearse durante la sinterización. En caso de que no se liguén, se requerirán de varios ciclos de sinterizado a presión, para obtener una completa densidad de la sinterización del estado sólido. Algunos de los compuestos que son preparados por este método son tungsteno-cobre, plata-grafito, hierro-cobre y níquel-plata. Empleándose, en pequeñas partes estructurales de metalurgia de polvos como magnetos, engranes, boquillas y contactos eléctricos.

La densificación durante la sinterización, se puede llevar a cabo por diversos mecanismos, incluyendo la difusión de volumen, el flujo plástico o el flujo viscoso.

### B.3) Sinterización del estado líquido

Este es uno de los métodos más interesantes para preparar compuestos particulados de fase coloidal, diferenciándose de la infiltración, por que las partículas tienen una apreciable solubilidad en la matriz líquida.

Por esta técnica, un compactado de polvo de una mezcla binaria o ternaria, es calentada a una temperatura en la cual una fase líquida es formada por la reacción entre los elementos. La sinterización y densificación toman lugar por solución y precipitación, seguidas por difusión de volumen. Durante la sinterización, el tamaño de las partículas dispersas aumenta por coalescencia y difusión de volumen.

Una microestructura formada por sinterización del estado líquido se caracteriza por una dispersión de partículas más o menos redondas, como resultado del proceso de precipitación de la solución.

El mecanismo convencional por el cual son preparados los compuestos de tungsteno-níquel-cobre, tungsteno-níquel-hierro, hierro-cobre, tungsteno-carburo-cobalto, titanio-carburo-níquel y magnetita-wüstite, es la sinterización en fase líquida. Estos materiales son empleados para cargas, escudos radioactivos, partes estructurales de metalurgia de polvos y ladrillos refractarios.

Como se observa, algunos compuestos sinterizados de fase líquida, poseen una ductibilidad muy rara, lo que ha generado un considerable interés.

#### B.4) Termoplásticos reforzados con hojuelas

Para estos compuestos se pueden utilizar los métodos empleados para la elaboración de compuestos de fibra de vidrio, conservando propiedades como el módulo y la resistencia. Los métodos de compactación y moldeo provocan la fragmentación de las hojuelas, para minimizar esta fragmentación durante el proceso, técnicas como el mezclado de polvos, el mezclado de látex y encapsulación han sido utilizados seguidos de un proceso de compresión. En estos casos el daño en las hojuelas es mínimo y buenas propiedades mecánicas son obtenidas. La hojuela contribuye en la alta rigidez y estabilidad dimensional en los compuestos y les provee propiedades dieléctricas, baja abrasión, baja permeabilidad y actúa como retardante al fuego.

#### B.5) Termofijos reforzados con hojuelas

Las técnicas empleadas para estos compuestos son: la impregnación, el rociado, el moldeo de hojas y el moldeo por bloque. Las cuales permiten una alta relación (diámetro/espesor) y la incorporación de la hojuela en la resina líquida o sólida.

Estos compuestos presentan baja resistencia al impacto (abajo de 53 J/m) por lo que es recomendable combinarlo con las fibras de vidrio que incrementan esta resistencia (cerca de 530 J/m).

## **C) Aplicaciones**

### **C.1) Rellenadores**

El término "rellenador" abarca a un rango muy amplio de materiales y se define arbitrariamente como un material sólido usado en plásticos con un porcentaje alto de volumen depositado, sin considerar los aditivos sólidos con bajas concentraciones tales como lubricantes, pigmentos, catalizadores y agentes antiestáticos.

En realidad no existe un relleno ideal, sólo para fines y usos específicos definirá las características deseadas tales como: físicas, químicas, eléctricas, costo adecuado y facilidad de procesamiento. Por lo que su uso potencial indicará las ventajas y desventajas de cada relleno y lograr así hacer una buena selección.

### **C.2) Agentes acopladores**

Silanos organofuncionales: este agente acoplador es muy empleado en la industria de las fibras de vidrio, como un tratamiento superficial confiable para promover el mejor procesamiento, resistencia y durabilidad, minimizando la fragilidad y el degradamiento en su manejo. A continuación se muestran algunos rellenos minerales y fibras de vidrio, que comercialmente se encuentran con un tratamiento superficial de silano organofuncional (tabla 3.2).

Cuando los rellenos minerales y refuerzos son agregados sin un tratamiento superficial, generalmente disminuyen las propiedades de la resina, se incrementa la sensibilidad a la humedad que puede resultar en una pérdida de resistencia del compuesto. Por lo que se hace evidente que el tratamiento superficial del relleno mineral o refuerzo con silanos organofuncionales ayudará a minimizar o eliminar esas propiedades decrecientes. Ejemplos de la mejora de propiedades con el uso de silanos organofuncionales se muestra en la tabla 3.3.

Rellenador	Organofuncional	Rellenador pretratado	Proveedor
<i>Alúmina Treidrada</i>	Amino Vinil Metacriloxi Epoxi	Hyflex	Industrias Solem Atlanta, GA 30340 (404) 455-0781
<i>Arcilla Calcinada</i>	Vinil	Burgess KE	Burgess Pigment Sandersville, GA 31082 (912) 552-2544
<i>Calcinada</i>	Vinil	Translink 37	Freeport-Koalin Gordon, GA 31082 (912) 628-2111
<i>Calcinada</i>	Amino	Trabslink 445	
<i>Hidratada</i>	Mercapto	Nucap 200	J. M. Huber, Clay Div. Huber, GA 31040 (912) 745-4751
<i>Hidratada</i>	Amino	Nulok 321	Huber, GA 31040 (912) 745-4751
<i>Silica</i>	Amino Vinil	Series Imsil	Illinois Minerals Cairo, IL 62914 (618) 734-4172
	Amino Epoxi Vinil	Series Novakup	Malven Minerals Hot Springs, AR 71901 (591) 623-8893
<i>Wollastonite</i>	Metacriloxi	Series	NYCO
<i>Silicato de calcio</i>	Amino Vinil Metacriloxi Epoxi	Wollastokup	Willsboro, NY 12996 (518) 963-4262
<i>Esferas de Vidrio: Sólidas</i>	Amino Metacriloxi	-	Potters Industries, Inc. Hasbrouck Hts., NJ 07604 (201) 288-4700
	Amino	-	Cataphote Div., Ferro Corp. Flowood, MS 39208 (601) 939-4612
<i>Hueccas</i>	Amino Metacriloxi	-	PQ Corp. Valley Forge, PA 19482 (215) 293-7452

Tabla 3.2 Fuentes comerciales de los silanos organofuncionales, rellenos pretratados

Rellenador	Cantidad de Rellenador ph <sup>b</sup>	Resistencia a la flexión (MPa)			
		Inicial		Después de sumergir en agua hirviendo por 8 horas	
		Sin Agente Acoplador	Silano Metacriloxi <sup>c</sup>	Sin Agente Acoplador	Silano Metacriloxi <sup>c</sup>
Silica 10 nm	120	71.02	122	59.29	100.7
Arcilla caolin calcinada	100	77.91	110.3	60.67	97.22
Arcilla caolin hidratada	88	69.64	75.84	31.03	44.82
Mica, alta relación de aspecto	40	19.31	44.82	17.93	24.13
Talco	100	60.67	71.02	30.34	49.64
Wollastonita	150	71.71	107.6	53.09	86.18
Alúmina Trihidratada	175	49.64	83.43	31.72	57.23

a) Resina Poliéster 100 partes por peso de relleno

b) Partes por peso por cien partes de peso de resina

c) Rellenador pretratado

Tabla 3.3 Resistencia a la flexión de compuestos de resina poliéster con diversos rellenos.

### C.3) Rellenadores minerales

#### C.3.1) Carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ )

El carbonato de calcio es uno de los minerales más abundantes en la tierra y químicamente estable. De las diferentes formas conocidas están: la piedra caliza, mármol, calcita, yeso, aragonita y dolomita. Es el relleno más comúnmente empleado con cloruro de polivinil, poliolefinas, fenólicas, poliésteres y epóxicas.

#### C.3.2) Caolín

Caolín es el nombre común del mineral Caolinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), consiste en capas alternadas de silicio con hidróxido de aluminio. Donde a una clase de este mineral se le conoce como arcilla.

#### C.3.3) "Feldspar"

Son minerales anhídricos, alcalinos y silicatos de aluminio que presentan excelente resistencia química. Se ofrece en grano grueso a medio, es más versátil que el carbonato de calcio y el sílice.

#### **Ventajas**

- . De transparente a translucido en la mayoría de los polímeros.
- . Fácil mojado y dispersión
- . Bajo efecto acelerador y aditivo
- . Baja viscosidad y alta movilidad en altas concentraciones.
- . Mejoramiento de la resistencia a la humedad y a la abrasión.
- . No tóxicos (en contacto con alimentos).

#### **Desventajas**

- . Por el tamaño (grano grueso) son abrasivos.
- . Asentamiento a bajas viscosidades.

#### C.3.4) Sílice (SiO<sub>2</sub>)

El sílice se divide en dos categorías que son naturales y sintéticos. Comercialmente los sílices sintéticos se dividen en cinco tipos: humeados, arco eléctrico, fusionadas, gel y precipitados.

Principalmente se emplean dos productos de sílice natural, en la fase bajo cuarzo y la diatomita. El cuarzo ofrece excelente aislamiento eléctrico y buenas propiedades mecánicas, mientras que la diatomita presenta una alta absorción de aceite.

#### C.3.5) Talco

El talco mineral es un silicato de magnesio hidratado y su fórmula teórica es:  $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ó 31.7% MgO, 63.5% SiO<sub>2</sub> y 4.8% H<sub>2</sub>O. Los compuestos rellenos con una capa de talco siempre exhiben una mayor rigidez y resistencia al deslizamiento.

#### C.4) Rellenadores metálicos, conductivos y magnéticos

El tamaño de la partícula, forma, estructura, pureza y su volumen en el compuesto afectan la conductividad en éste. Los rellenos empleados en plásticos son metales y el grafito, los óxidos, vidrios y minerales ayudan a la conductividad térmica. El níquel, aluminio y acero inoxidable son usados en interferencia electromagnética, el carbón es usado para cargas electrostáticas. La ferrita es la más utilizada por ofrecer propiedades magnéticas y pueden ser trabajadas con resinas flexibles y duras.

#### C.5) Retardadores al fuego y supresores de humo

La adición de los retardadores al fuego hacen al polímero no combustible, el objetivo de la retardación es aumentar la resistencia de encendido del plástico.

La propiedad más importante de algunos de estos materiales es el efecto de incrementar la formación de carbón, resultando un supresor de humo del plástico quemándose. Generalmente son aplicados en textiles, papel, productos de madera y pinturas.

#### C.5.1) Oxido de antimonio

Es empleado en combinación con compuestos de halógeno para tener una retardancia a la flama en plásticos y textiles.

#### C.5.2) Trihidrato de alúmina. (Gibbíta)

Es un relleno mineral refinado que ofrece el complemento de retardación al fuego y supresión de humo, no es tóxico y es químicamente inerte. Se emplea en tubos de poliéster insaturado, contratopos y dispositivos de almacenamiento.

#### C.5.3) Fósforos y halógenos

Son los primeros retardantes a la flama usados en plásticos y resinas. Se clasifican en aditivos (sólidos y líquidos) y reactivos (químicos).

#### C.6) Rellenadores orgánicos

Los materiales orgánicos tienen actualmente aplicación como rellenos y reforzamientos para plásticos. Al principio fueron de origen natural y se encontraban en abundancia a un bajo costo, como ejemplo tenemos: algodón, fibras vegetales, aserrín, los cuales son de estructura fibrosa compuestos en gran parte de celulosa y bajas cantidades de lignina.

Dentro de este tipo de materiales, también se incluye el carbón. Nombre dado a una amplia variedad de pigmentos finamente divididos. Es usado como reforzante y colorante, en combinación con caucho, tintes, pinturas, plásticos, papel, capas protectoras y en conductores eléctricos.

Es empleado en un amplio rango de termoplásticos y resinas termoeestables, generalmente su uso en los plásticos involucra una o varias de las siguientes características: estabilización contra la luz ultravioleta, refuerza las propiedades mecánicas y reducción de costos (como rellenedor).

Algunas de sus aplicaciones son: Tuberías de alta presión, películas, cintas, ductos de calefacción, paneles Solares y perfiles extruidos.

#### C.7) Rellenadores esféricos

La forma esférica muestra una superficie baja a la razón de volumen, lo que limita el área de absorción de la resina, también disminuye la abrasión de las superficies del equipo del proceso. Este tipo de materiales se dividen en dos: sólidos y huecos.

Dentro de los sólidos se encuentran las esferas de: vidrio, microgotas de cerámico, microesferas de metal y polímero.

Las esferas huecas son las aplicadas en la industria del plástico, sus principales propiedades son: el control de la densidad y el aumento de la resistencia al impacto.

# Material Reforzado con Láminas

### **A. Teoría**

Una capa simple de un material compuesto laminado es referido generalmente como una pieza o lámina, la cual puede tener un espesor mínimo de 0.13mm en el caso de una capa orientada o un espesor mínimo de 6mm para el caso de un material formado de capas alternadas. Una lámina simple es generalmente demasiado delgada para ser empleada directamente con alguna aplicación en ingeniería.

En los compuestos laminados, los constituyentes se encuentran arreglados en series de capas y son considerados como otra forma de compuestos porque son combinaciones micro o macro de materiales que producen propiedades mejoradas o diferentes en comparación con las de sus respectivos constituyentes. Generalmente son empleados con diversos propósitos como: recubrimientos muy delgados, superficies protectoras más gruesas, revestimientos, elementos bimetalicos y laminados. Algunos compuestos laminados son diseñados para mejorar la resistencia a la corrosión manteniendo un bajo costo, alta resistencia-bajo peso, una gran resistencia al desgaste por abrasión, mejorar apariencia y características poco usuales de expansión térmica.

Sin embargo, la combinación de diferentes materiales en forma laminar induce a problemas que no se experimentan en los materiales individuales de fase simple. Las capas o estratos individuales en un material laminado pueden estar formados del mismo constituyente, pero con diferentes orientaciones de las fibras en cada capa alternada. O bien, las capas pueden ser de materiales totalmente diferentes, en la figura 4.1 se muestra un ejemplo de una estructura compuesta laminada.

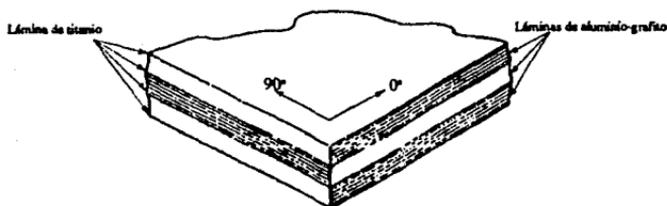


FIG 4.1 Laminado compuesto de capas alternadas (aluminio-grafito y titanio)

## **B. Clasificación**

### **B.1) Láminas Unidireccionales**

Aunque hay muy pocas aplicaciones prácticas de compuestos basados en láminas unidireccionales debido, principalmente, a la rigidez y en particular a las resistencias transversales a cortante y a tracción, que son mucho menores que las resistencias y rigidez paralelas a las fibras. Para entender las relaciones de cálculo de la resistencia de las láminas, se considerará que están en función de la resistencia de las fibras y de la matriz así como de los mecanismos de ruptura.

Dicho análisis se basa en las ecuaciones tratadas en el capítulo 3 (materiales compuestos reforzados con fibras).

## B.2) Propiedades elásticas de una lámina unidireccional

El material se tratará como cuerpo "ortotrópico" en su construcción al considerar propiedades elásticas de compuestos laminados, los cuales tienen tres planos de simetría mutuamente perpendiculares, donde las propiedades que presenta en cualquier punto son diferentes en tres direcciones mutuamente perpendiculares. Para la determinación de estas propiedades se utiliza la teoría de laminado, una de las aplicaciones más directas ha sido hecha por Jones (1975), que usó la teoría de elasticidad isotrópica (la cual requiere algunos conocimientos de álgebra de matrices) y nos dice lo siguiente:

Los esfuerzos en un punto de un sólido pueden ser representados por los esfuerzos que actúan sobre las superficies de un cubo, en este punto se usa la notación que se muestra en la figura 4.2:

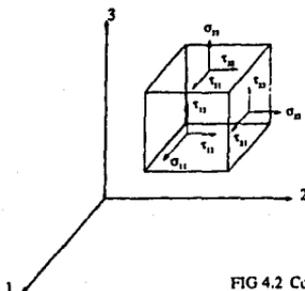


FIG 4.2 Componentes del esfuerzo que actúan sobre un cubo

Hay tres esfuerzos normales  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ ; tres esfuerzos cortantes  $\tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{12}$ , y las deformaciones correspondientes vienen dadas por la notación  $\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \gamma_{23}, \gamma_{31}$  y  $\gamma_{12}$ .

Quando es aplicado un esfuerzo unidireccional a tracción en un sólido, la deformación elástica  $C$  en la dirección del esfuerzo aplicado es relacionada de la siguiente manera:

$$\sigma = E\varepsilon$$

donde E es el módulo de Young. Para un material isotrópico E y  $\nu$  (módulo de Poisson) son independientes de la dirección del esfuerzo aplicado. El módulo a cortante "G" se define por:

$$\tau = G\gamma$$

donde  $\gamma$  es la variación angular en radianes. Para un material isotrópico

$$G = E/2(1+\nu)$$

La ley de Hooke expresada en forma general es la siguiente:

$$\sigma_i = \sum C_{ij}\varepsilon_j \quad j=1..6$$

donde  $\sigma_i$  son los componentes del esfuerzo, los  $\varepsilon_j$  son los componentes de la deformación,  $C_{ij}$  es la rigidez de la matriz. Haciendo algunas transformaciones, y al considerar propiedades isotrópicas y que es una lámina delgada, algunos esfuerzos serán nulos y al considerar que existirá un ángulo  $\theta$  con las direcciones principales del material, es posible obtener expresiones para las propiedades elásticas  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$  y  $\nu_{xy}$  correspondientes al sistema de coordenadas x-y. Estas son:

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_1} c^4 + \left| \frac{1 - 2\nu_{12}}{G_{12}} \frac{1}{E_1} \right| s^2 c^2 + \frac{1}{E_2} s^4$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{1}{E_1} s^4 + \left| \frac{1 - 2\nu_{12}}{G_{12}} \frac{1}{E_1} \right| s^2 c^2 + \frac{1}{E_2} c^4$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = 2 \left| \frac{2}{E_1} + \frac{2 + 4\nu_{12}}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right| s^2 c^2 + \frac{1}{G_{12}} (s^4 + c^4)$$

$$v_{xy} = E_x \left[ \frac{v_{12}(s^4 + c^4)}{E_1} - \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right) s^2 c^2 \right]$$

donde  $s$  y  $c$  son  $\sin\theta$  y  $\cos\theta$  respectivamente. Así conociendo  $E_1, E_2, G_{12}$  y  $v_{12}$  se pueden calcular las propiedades elásticas a cualquier ángulo.

Para realizar los cálculos teóricos se hacen una serie de hipótesis, las cuales son:

- i) Las láminas están perfectamente unidas y sin deslizamiento relativo entre ellas.
- ii) La unión entre las láminas es infinitamente delgada.
- iii) El laminado tiene las propiedades de una hoja delgada.

Con estas hipótesis es posible considerar el laminado como una placa elástica delgada y así poder deducir la distribución de deformaciones por toda la placa cuando es sometida a fuerzas externas. La teoría de laminación proporciona un método para calcular las fuerzas y momentos resultantes por unidad de longitud que actúan sobre el laminado, integrando los esfuerzos que actúan en cada lámina a través del espesor del laminado.

Considerando el caso de un laminado cruzado (figura 4.3), en el cual  $E_{11} \neq E_{22}$ , al aplicar un esfuerzo en cada lámina se observa una deformación con un nuevo módulo a tracción de modo que  $E_{11} > E_L > E_{22}$ , dejando en claro que los esfuerzos a tracción en cada lámina no son los mismos y dan lugar a unas fuerzas de acoplamiento que producen esfuerzos adicionales en el plano normal al eje de tracción.

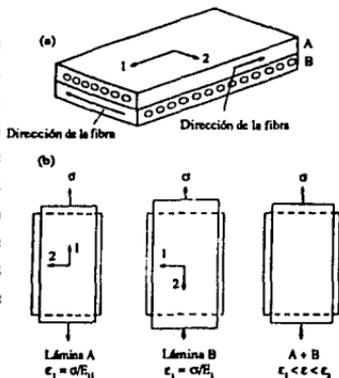


FIG 4.3 Laminado de dos capas de láminas cruzadas. (a) Forma (b) Ilustración de las diferentes deformaciones al aplicar un esfuerzo determinado.

Dichas fuerzas se pueden observar en dos formas:  
**Primero** tomar un laminado cruzado de dos capas y calentarlo, al tener diferente dilatación, se doblará como en la figura 4.4. **Segundo** al aplicar una deformación fija a cada una, por ser  $E_{11} \neq E_1$  requerirán de esfuerzos diferentes para producir la misma deformación, en este punto al unir las entre sí, el laminado nuevamente se doblará y requerirá de esfuerzos adicionales para

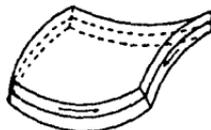


FIG 4.4 Distorsión producida por el calentamiento del laminado

mantenerse plano. En un laminado equiangular de dos capas como el que se ilustra en las figuras 4.5 y 4.6, se aplican los argumentos anteriores. Esto es debido a que no son simétricos con respecto al plano medio. Por esto, en la práctica comúnmente se usan laminados simétricos, dependiendo del número y espesor de las láminas orientadas diferentemente al plano medio como se observa en la figura 4.7. Para el laminado de la figura 4.7b, los esfuerzos de acoplamiento disminuyen conforme aumentan las capas.

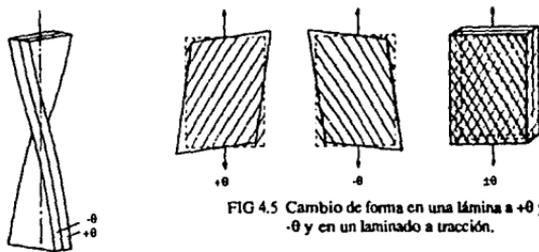


FIG 4.5 Cambio de forma en una lámina a +θ y -θ y en un laminado a tracción.

FIG 4.6 Cambio de forma de un laminado en un ángulo no simétrico bajo calentamiento.

### B.3) Laminados cruzados simétricos

Considerando la estructura laminar ilustrada en la figura 4.7c formada de tres capas orientadas en una dirección y dos capas orientadas en otra dirección, la relación de espesores  $3t_1/2t_2$  puede expresarse como una relación de fracciones de volumen  $V_A/V_B$ , dado el mismo ancho y el mismo largo en las láminas.

Dichas fuerzas se pueden observar en dos formas:  
**Primero** tomar un laminado cruzado de dos capas y calentarlo, al tener diferente dilatación, se doblará como en la figura 4.4. **Segundo** al aplicar una deformación fija a cada una, por ser  $E_{11} \neq E_1$  requerirán de esfuerzos diferentes para producir la misma deformación, en este punto al unir las entre sí, el laminado nuevamente se doblará y requerirá de esfuerzos adicionales para

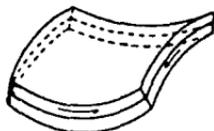
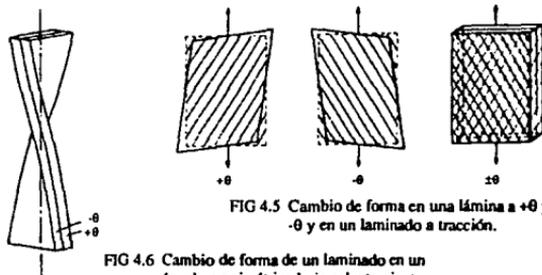


FIG 4.4 Distorsión producida por el calentamiento del laminado

mantenerse plano. En un laminado equiangular de dos capas como el que se ilustra en las figuras 4.5 y 4.6, se aplican los argumentos anteriores. Esto es debido a que no son simétricos con respecto al plano medio. Por esto, en la práctica comúnmente se usan laminados simétricos, dependiendo del número y espesor de las láminas orientadas diferentemente al plano medio como se observa en la figura 4.7. Para el laminado de la figura 4.7b, los esfuerzos de acoplamiento disminuyen conforme aumentan las capas.



### B.3) Laminados cruzados simétricos

Considerando la estructura laminar ilustrada en la figura 4.7c formada de tres capas orientadas en una dirección y dos capas orientadas en otra dirección, la relación de espesores  $3t_1/2t_2$  puede expresarse como una relación de fracciones de volumen  $V_A/V_B$ , dado el mismo ancho y el mismo largo en las láminas.

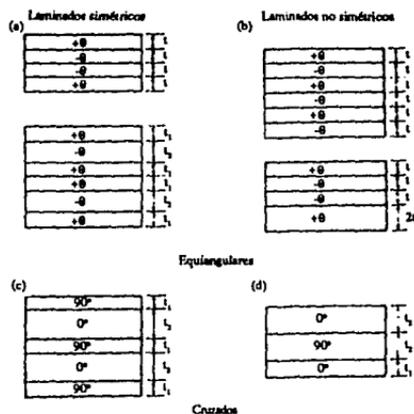


FIG 4.7 Ejemplos de laminados simétricos y no simétricos

En el caso ortorrópico, la matriz de rigidez  $Q$  después de eliminar los elementos nulos por las condiciones antes dichas nos queda como:

$$\begin{aligned} Q_{c11} &= V_A Q_{11} + V_B Q_{22} \\ Q_{c12} &= V_A Q_{12} + V_B Q_{21} = Q_{12} \\ Q_{c22} &= V_A Q_{22} + V_B Q_{11} \\ Q_{c66} &= V_A Q_{66} + V_B Q_{66} = Q \end{aligned}$$

c: Lámina cruzada

donde:

$$Q_{11} = C_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad ; \quad Q_{12} = C_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = -\frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = C_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad ; \quad Q_{66} = \frac{1}{2} (C_{11} - C_{12}) = G_{12}$$

para:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{c1} \\ \sigma_{c2} \\ \tau_{c12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{c11} & Q_{c12} & Q_{c16} \\ Q_{c12} & Q_{c22} & Q_{c26} \\ Q_{c16} & Q_{c26} & Q_{c66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{c1} \\ \epsilon_{c2} \\ \gamma_{c12} \end{bmatrix} \dots (1)$$

$$Q_{16} = Q_{26} = 0$$

#### B.4) Láminas equiángulares simétricas

La figura 4.8 nos muestra que las orientaciones de las fibras en las láminas se disponen en la dirección principal a  $\pm\theta$ . La matriz de rigidez para los laminados cruzados y angulares está dada por:

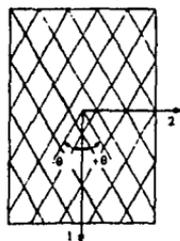


FIG 4.8 Ejes de simetría en un laminado angular

$$Q_{a11} = \frac{E_{a1}}{1 - \nu_{a12}\nu_{a21}}$$

$$Q_{a12} = \frac{\nu_{a12}E_{a2}}{1 - \nu_{a12}\nu_{a21}} = -\frac{\nu_{a21}E_{a1}}{1 - \nu_{a12}\nu_{a21}}$$

$$Q_{a22} = \frac{E_{a2}}{1 - \nu_{a12}\nu_{a21}}$$

$$Q_{a66} = G_{a12} \quad a: \text{angular}$$

de esta forma las propiedades elásticas son calculadas en la ecuación (1) considerando:

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{22}s^4$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(s^4 + c^4)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{22}c^4$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})sc^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})s^3c$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})sc^3$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{12} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(s^4 + c^4)$$

#### B.5) Determinación de los esfuerzos que actúan sobre una lámina individual

Para la determinación de los esfuerzos que son causantes de fractura y que actúan sobre una lámina, se han identificado tres procesos y son los siguientes:

i) Fractura de la fibra.

ii) Agrietamiento paralelo a las fibras por tracción transversal.

iii) Fractura a cortante paralelo a las fibras.

Para llevar a cabo su cálculo, la ecuación esfuerzo-deformación del laminado (ec. 1) se invierte para obtener la ecuación de deformación-esfuerzo y haciendo una serie de transformaciones se obtienen las ecuaciones siguientes:

- Efecto en la primera lámina (1)

$$\frac{1\sigma_{11}}{\sigma_{c1}} = \frac{(1/2)E_1(E_1+E_2) - \nu_{12}^2 E_2^2}{(1/4)(E_1+E_2)^2 - \nu_{12}^2 E_2^2} \quad \text{si } \nu_A = \nu_B = 1/2$$

$$\frac{1\sigma_1}{\sigma_{c1}} = \frac{(1/2)\nu_{12}E_2(E_1-E_2)}{(1/4)(E_1+E_2)^2 - \nu_{12}^2 E_2^2}$$

- Efecto en la segunda lámina (2)

$$\frac{2\sigma_{11}}{\sigma_{c1}} = \frac{(1/2)\nu_{12}E_2(E_2-E_1)}{(1/4)(E_1+E_2)^2 - \nu_{12}^2 E_2^2}$$

$$\frac{2\sigma_1}{\sigma_{c1}} = \frac{(1/2)E_1(E_1+E_2) - \nu_{12}^2 E_2^2}{(1/4)(E_1+E_2)^2 - \nu_{12}^2 E_2^2}$$

Haciendo  $E_1/E_2=10$  y  $\nu_{12}=0.15$ , la figura 4.9 muestra como actuarían los esfuerzos en una lámina cruzada. Para láminas angulares se emplea un razonamiento similar para calcular los esfuerzos.

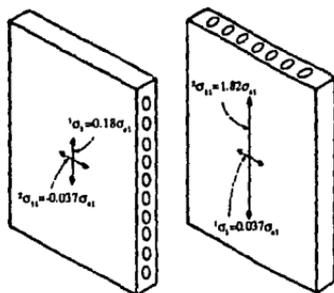


FIG 4.9 Esfuerzos de un laminado cruzado simétrico debidos a un esfuerzo de tracción  $\sigma_{11}$ .

### C. Procesos de manufactura

Para producir los compuestos laminados se emplean una gran variedad de procesos de manufactura como son:

#### C.1) Extrusión

En la extrusión se usa un carrete de hilos continuos, algunas veces combinados con tapetes o fibras entretrejidas, impregnadas con resina que se extruyen a través de un dado calentado a una temperatura aproximada de 400K. Por este proceso se producen piezas estructurales tales como vigas, barras, tuberías, paneles aislantes así como otras formas estructurales (fig 4.10).

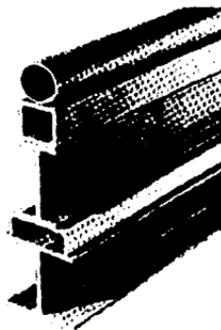


FIG 4.10 Formas extruidas

#### C.2) Formado superplástico/unión por difusión

La propiedad de superplasticidad unida con la unión por difusión provee compuestos para la era espacial. La superplasticidad muestra una propiedad de los metales aleados que no son considerados dúctiles a temperatura ambiente, pero a temperaturas altas poseen alta ductilidad.

La unión por difusión o prensado en caliente es una técnica muy empleada para la elaboración de los metales reforzados con fibras. La matriz es usualmente una lámina, con los filamentos o alambres esparcidos y orientados entre las láminas para formar capas alternantes de filamentos y matriz.

Esta técnica se lleva a cabo primeramente enrollando las fibras en una hoja de metal, los tapetes resultantes son cortados y hechos cintas por la unión por difusión a altas temperaturas y presión. Las cintas resultantes se cortan en lienzos, acomodándose en bloques y unidos posteriormente por difusión.

El formado superplástico/unión por difusión usa aleaciones de titanio para elaborar la mayor parte de la estructura de los aviones. Este proceso, usa una o más hojas de titanio sobrepuestas y unidas firmemente por una plantilla mientras es calentada en un horno (fig. 4.11). El argón se inyecta a través de pequeños barrenos perforando las láminas en los lugares deseados. Cuando el titanio alcanza un estado superplástico blando y flexible, el gas ayuda al titanio a expandirse en celdas, mientras que las láminas exteriores permanecen planas y la estructura interna toma cualquiera de las formas deseadas. A través de este proceso, las láminas exteriores fluyen bajo presión para formar una unidad expandida en forma de sandwich que tiene la resistencia de una sola pieza de titanio.

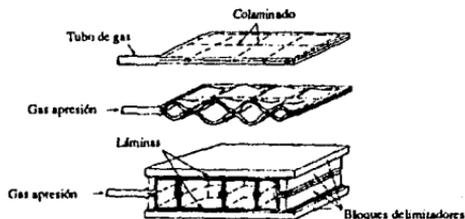


FIG 4.11 Formado superplástico y unido por difusión

### C.3) Preformas

Para este proceso se utilizan fibras entretejidas las cuales son impregnadas con resina polimérica, sin llegarse a curar. En este preestado se colocan varias capas de tejido con la orientación deseada y son calentadas bajo presión, de modo que la resina llegue a curar y formar el compuesto.

### C.4) Cintas

Con la ayuda de un devanador las fibras son esparcidas entre las preformas de la resina polimérica (fig. 4.12). Las cintas de hasta 1.2micras de ancho se unen para producir una más ancha o se apilan para una más gruesa, completando el proceso con calor y presión.

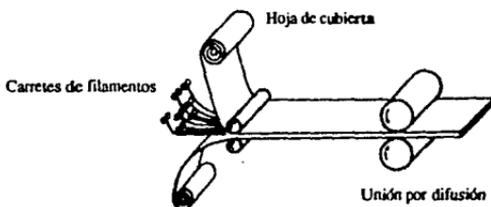


FIG 4.12 Laminado y unión de capas por difusión.

### C.5) Prerrecubrimientos

La fibra puede ser impregnada con metal fundido, rociado con plasma, con deposición por vapor o electrodeposición para producir cintas y posteriormente unirse mediante otras técnicas.

### C.6) Unión o soldadura por deformación y por difusión

Para este proceso se utiliza la compresión en caliente o el laminado para unir las cintas, donde se apilan hasta el espesor adecuado para que cuando se aplique la presión y la temperatura se unan las superficies (fig. 4.13). La difusión actúa para unir la matriz con la fibra y las superficies entre capas, que junto con la compresión forma un compuesto más denso.

### C.7) Soldadura explosiva

Nos sirve para unir superficies mediante una fuerza explosiva, incluyendo el enchapado de hojas de hasta 3X9m y de piezas forjadas sencillas, así como el revestimiento y unión de tubos y la combinación de metales no semejantes en lingotes y partes diversas.

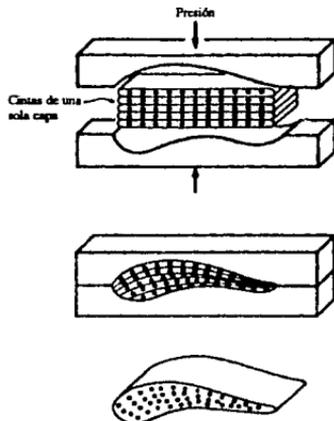


FIG 4.13 Compresión y unión simultánea de capas

Las piezas que van a ser unidas se colocan a poca distancia, formando un ángulo una con otra generalmente, de tal forma que choquen en una línea de avance cuando son golpeadas por la explosión. En condiciones apropiadas, las altas presiones expelen capas delgadas de las capas incidentes, aplastando las superficies metálicas poniéndolas en contacto íntimo para lograr una unión uniforme. Por este método incidentalmente se genera calor, no ocurriendo fusión. Así se pueden unir metales desiguales sin acción térmica. El equipo es sencillo, pero las ondas explosivas requieren cierto aislamiento.

## **D. Aplicaciones**

### **D.1) Compuestos laminares**

Un compuesto laminar muy conocido es el triplay, en él las hojas de madera se disponen en ángulo recto entre cada capa alternada, unidas con resina fenólica o de amino. Con el triplay se fabrican productos baratos y de grandes dimensiones, resistente a rajaduras y deformaciones.

Otro compuesto laminar es el vidrio de seguridad en el cual dos hojas de vidrio son unidas con un adhesivo plástico (butiral polivinilo), al romperse el cristal, el adhesivo impide que vuelen los fragmentos. Los laminares se usan como aislantes para motores, engranes, tabillitas de circuitos impresos, en cubiertas y muebles con formica.

Las propiedades obtenidas son: bajo peso, inactivación a la flama, resistencia al impacto y a la corrosión, fácil conformado y maquinabilidad, así como aislamiento.

### **D.2) Recubrimientos duros**

Los recubrimientos duros son superficies resistentes al desgaste protegiendo uno más suave y dúctil, unidas por la soldadura por fusión. Se pueden obtener mejoras en la resistencia a la corrosión o al calor en las superficies.

### **D.3) Metales de revestimiento**

Por lo general son aleaciones metal-metal, un ejemplo es la aleación de alto níquel de un color plata, mientras que el corazón es de cobre brindando un bajo costo.

Otro revestimiento es el Alclad que es resistente a la corrosión y de alta resistencia, formado de un aluminio puro unido con otro aluminio de mayor resistencia. Se utiliza en la construcción de aeronaves, intercambiadores de calor, edificios y tanques de almacenamiento.

#### D.4) Bimetales

Este material está compuesto de dos tiras de metal rígidamente unidas, con diferentes coeficientes de dilatación lo que provoca que el elemento bimetálico produzca una curvatura. Los elementos bimetálicos deben tener: a) coeficientes de dilatación muy diferentes, (b) propiedades reversibles y repetibles de expansión y (c) un alto módulo de elasticidad.

Se utilizan como relevadores, donde la tira puede encender o apagar un horno o calefactor para regular la temperatura. También pueden actuar como interruptores de circuito, así como termostatos; si la corriente que circula por el circuito es alta, el calentamiento provocará la deflexión y abrirá el circuito.

## Capítulo 5

### Otro Tipo de Reforzamiento

Dentro de los materiales compuestos existen otros tipos diferentes a los ya expuestos anteriormente y estos son las estructuras en forma de sandwich y los híbridos, de los cuales hablaremos a continuación.

#### A. Estructuras en forma de sandwich

Aunque el empleo de esta estructura se concibió en el año de 1820, comercialmente se empezó a utilizar 110 años después, debido a su bajo peso y aplicaciones especiales que puede llegar a tener. Es una de las primeras formas estructurales que ha tenido una gran aceptación y uso. Se encuentra formada de tres elementos principalmente, mostrados en la figura (5.1) y los cuales son:

- i) Un par de capas delgadas y resistentes.
- ii) Un centro ligero y sólido empleado para separar las caras y transmitir cargas de una cara a la otra.

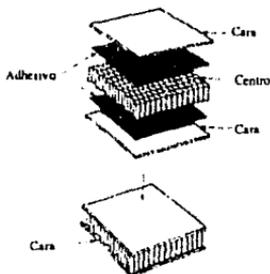


FIG 5.1 Diagrama de una estructura sandwich

iii) Un enlace, el cual es capaz de transmitir cargas cortantes y axiales entre el centro y las caras.

Debido a la gran aceptación de estas estructuras, se da como punto de partida la década de los 30 para la elaboración de adhesivos estructurales, dando como resultado el desarrollo de las gomas fenólicas y el vinil fenólico, los cuales inician la revolución tecnológica de los adhesivos. Permitiendo una mejora en los métodos de limpieza de superficies metálicas, bajo peso-alta resistencia, flexibilidad de los materiales centrales del panel, capas de adhesivos en estado "B", elaboración de vidrio y cintas preimpregnadas alineadas con medidas exactas de resina en estado "B".

La aplicación de estas estructuras se puede observar en vehículos aéreos y espaciales, en la elaboración de recipientes de carga, casas móviles, superficies de pistas de aterrizaje, interiores de embarcaciones marítimas, pequeños botes y yates, partes empleadas en la industria automotriz y vehículos recreativos, esquís de nieve, mostradores, divisiones, interiores, puertas, gabinetes y una gran cantidad de artículos de uso común.

#### A.1) Materiales de las caras

Estos materiales representan el reforzamiento del compuesto y tienen como función principal proveer la disminución de esfuerzos a cortante, a tensión o a compresión que se presentan en el plano. Generalmente para formar las caras, se emplean los paños de fibra de vidrio impregnadas con resina (comúnmente pretratadas), grafito pretratado (en capas unidireccionales o entretrejidas), aleaciones de aluminio 2024 ó 7075, titanio o acero inoxidable.

Para llevar a cabo la selección del material de las caras (así como del centro, pegamentos u otros materiales) para una aplicación específica, es conveniente examinar por lo menos las características de los materiales, tales como la flexibilidad o fragilidad, modo de fractura, durabilidad y permeabilidad, compatibilidad con remaches y pernos u otros atributos los cuales puedan afectar directamente el aprovechamiento o ventajas del producto final, aun cuando no se vean involucrados directamente en el análisis de esfuerzos o ahorro de peso.

En la tabla 5.1 se listan las propiedades mecánicas de diversos materiales superficiales comunmente empleados.

Materiales Superficiales a la cedencia	Resistencia a la Elasticidad MPa	Módulo de espesor MPa	Peso por 1-mm <sup>2</sup>
Aluminio			
2024-T3	800	160	2.69
5052-H34	416	160	2.59
6061-T6	560	160	2.69
7075-T6	1169	160	2.69
Acero dulce	800	480	7.68
Acero inoxidable			
316	961	480	7.68
17-7	3200	480	7.68
Titanio			
Aleación Ti-75A	1280	240	4.52
Tratado term 6Al-4V	2290	269	4.42
Grafito en petatillo	1280	160	1.54
Grafito unidireccional	3500	320	1.54
Fibra de vidrio tipo E en forma de petatillo	224	14.7	1.35
Fibra de vidrio trenzada	608	29.6	1.35
Fibra de vidrio preturada			
Epoxi	1039	56	1.83
Epoxi	990	56	1.69
Fenólica	769	56	1.81
Poliéster	769	56	1.92
Poliámid	961	56	1.83
Kevlar preturada con epoxi	961/448	70	1.35
Triplay			
Abeto Douglas, grado exterior	42	29	0.58
Pino del sur	42	29	0.58
Lauan	36	29	0.38

Nota: Cuando se este trabajando con superficies de madera, el espesor "efectivo" debe ser usado excepto en centros de localizados.

Espeor actual	Espeor "efectivo"	Peso (Kg/m <sup>2</sup> )
6mm	4mm	3.90
10mm	4mm	5.37
13mm	7mm	3.32

Tabla 5.1 Propiedades mecánicas de materiales superficiales para sandwich.

## A.2) Materiales del centro

Estos materiales tienen la función de una matriz, con la cual se busca estabilizar las caras y transmitir las cargas cortantes a través de su espesor, y pueden ser tan rígidas y ligeras como sea posible, proporcionando propiedades uniformes en el medio ambiente.

## A.2.1) Tipos de materiales centrales

### A.2.1.1) Madera

La madera se considera como un alto polímero debido a la estructura y propiedades que presenta, cuya estructura es bien conocida y se ilustra en la figura 5.2.

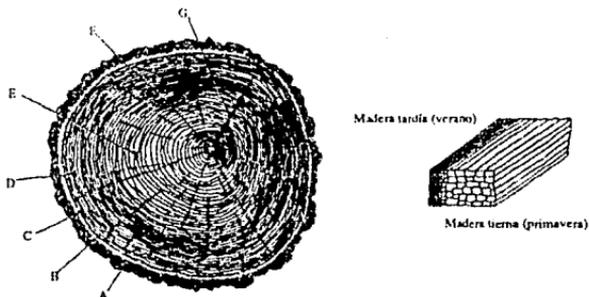


FIG 5.2 Corte transversal del tronco de un árbol

Donde se observa la microestructura de un árbol compuesto por: La corteza (A) que protege al tronco del árbol junto con la corteza interna (B); El cambium (C) contiene células nuevas y en crecimiento; el alburno contiene algunas células vivas que almacenan nutrientes y el duramen o corazón que contiene solamente células muertas, aumentando año con año y representa la mayor parte del tronco proporcionando soporte mecánico. Otra característica no mostrada son las grietas, las cuales son separaciones a lo largo y rajaduras, que son las marcas entre los anillos de crecimiento anual. Las variaciones estacionales en la temperatura exterior producen dos etapas de crecimiento en la propia madera. Una etapa muy rápida que se presenta en la primavera y otra muy lenta que ocurre en el verano produciendo una madera más densa y más resistente. Para entender las propiedades mecánicas es importante conocer los aspectos debidos a sus características particulares.

Existen dos tipos principales de madera, que son la dura y la blanda. En general las maderas duras son de árbol de hojas anchas y las maderas suaves son de coníferas o árboles con hojas en forma de agujas. Teniendo cada una su microestructura característica. El 90% de la estructura de la madera se compone de células longitudinales denominadas "traqueas", que tienen 0.254cm de longitud, 0.00254cm de diámetro y un espesor de pared de 0.000762cm. Unidas entre sí con una sustancia llamada "lignina".

La madera es un material estructural importante, pero debido a su gran anisotropía y propiedades higroscópicas, presenta ciertas limitaciones; aunque es resistente a los ácidos orgánicos comunes, a la temperatura ambiente y a temperaturas ligeramente mayores. En la actualidad se emplean diversos métodos para el mejoramiento de la estabilidad dimensional o la resistencia cuando es expuesta al medio ambiente, éstos han llevado a la creación de formas comerciales de madera modificada, como son la "impreg" y la "compreg".

La "impreg" se obtiene al impregnar capas delgadas de hojas de madera con una resina fenólica, de modo que las cavidades de las células se llenen y unan con la resina, con un curado de 150 °C a 160 °C para producir uniones cruzadas. Las hojas tratadas suelen ensamblarse y pegarse con la misma resina. La madera "compreg" también se elabora impregnando hojas de madera con la resina, pero el curado se lleva a cabo bajo presión suficiente para comprimir la mayor parte de las maderas, hasta obtener una gravedad específica de 1.3 a 1.35, siendo más fuerte que la "impreg".

Para los centros de estructuras sandwich se emplean diversos materiales y de éstos la madera es la más utilizada desde la antigüedad. Algunas de sus aplicaciones se observan en centros de puertas, divisiones y artículos arquitectónicos. También es empleada en la mayoría de los esquies de nieve, aunque la tendencia actual es con respecto al panel, espumas o centros de plástico reforzado, tiene una gran aceptación en botes de navegación y en el reemplazo de pisos de muchas aeronaves.

La ventaja tradicional del bajo costo de la madera se ha visto afectada progresivamente, debido a la dificultad de abastecimiento, no obstante la facilidad de uso y la excelente durabilidad del producto ha dado como resultado un incremento en su uso.

particularmente de los granos cuidadosamente seleccionados para aplicaciones tales como cascos de botes, grandes tanques, paletas de transportadores aéreos y contenedores. Este aumento en sus aplicaciones son impulsados por sus excelentes propiedades de resistencia a la compresión y los módulos, cuando son comparados con el panel de papel de aramid el cual es más expansivo. En la tabla 5.2 se listan las propiedades mecánicas de tres tipos de madera de balsa comunmente empleados.

Densidad			96 Kg/m <sup>3</sup> MPa	176 Kg/m <sup>3</sup> MPa	248 Kg/m <sup>3</sup> MPa
Valores a cortante					
Grano fino	Resistencia	(superior)	3.45	10.0	15.9
		(inferior)	5.17	13.2	20.3
	Módulo		2275.0	5295.0	8025.0
Grano grueso	Resistencia	(superior)	0.58	0.993	1.36
		(inferior)	0.34	0.689	1.0
	Módulo		110.0	255.0	379.0
		(inferior)	35.1	89.6	137.0
Valor a tensión					
Grano fino	Resistencia	(superior)	9.48	21.0	31.2
Grano grueso	Resistencia	(superior)	0.77	1.17	1.54
		(inferior)	0.49	0.814	1.07
Valor a compresión					
	Resistencia	(superior)	1.24	2.48	3.59
		(inferior)	1.09	2.03	2.93
	Módulo		110.0	255.0	379.0

Tabla 5.2 Propiedades de la madera balsa cuando se usa como sandwich

#### A.2.1.2) Espuma

Las espumas son dispersiones de una gran cantidad de gas en una pequeña cantidad de líquido. Algunos polímeros, incluyendo el uretano y el poliestireno pueden ser expandidos en forma de espuma, con huecos celulares que disminuyen la densidad del plástico. El polímero es producido primero como pequeñas gotas sólidas que contienen el agente expansor o insuflador. Cuando las gotas son calentadas, el polímero se vuelve plástico, el agente se descompone para formar un gas dentro de la gota y las paredes de ésta se expanden. Así al ser introducidas en un molde caliente las gotas preexpandidas se juntan y pegan entre sí produciendo una forma determinada.

Las espumas, son fundamentalmente sistemas inestables debido a las grandes superficies y a su interfase. Para evitar esto se ocupan los agentes tensioactivos que proporcionan estabilidad a las espumas por medio del aumento de la viscosidad superficial de la capa, reduciendo a su vez el escurrimiento y prolongando la duración de la espuma.

Los agentes antiespumantes reducen la viscosidad por medio del desplazamiento del agente espumante, de la interfase, produciendo una nueva capa interfásica de viscosidad menor, la cual disminuye la elasticidad de la capa en una forma considerable. Las espumas sólidas con pared fuertemente rígida son estables en forma indefinida y pueden ser tanto flexibles como rígidas, dependiendo de la naturaleza de los materiales que la forman.

Las espumas pueden poseer estructuras celulares abiertas o cerradas o una combinación de ambas. Las espumas con celdillas cerradas se producen cuando persiste alguna presión durante el proceso de formación de las celdillas, mientras que las espumas de celdilla abierta se forman durante una expansión libre.

#### A.2.1.2.1) Componentes de una espuma

a) Agentes espumantes: La selección del agente espumante apropiado es cada vez más importante, ya que, la calidad de acabado de un artículo de plástico espumado, depende grandemente del agente que se seleccione.

Existen varias técnicas para espumar plásticos; la más directa es usar la química del material. Un ejemplo lo tenemos en la reacción de la espuma del uretano rígido espumada con agua, donde la reacción isocianato-agua genera  $\text{CO}_2$  (agente espumante).

Otra técnica poco usada es la mezcla de esferas huecas o de cargas porosas con el polímero; el material resultante de baja densidad es llamado "espuma sintética". Se emplean microesferas de polivinilideno-acrilonitrilo para hacer estas espumas. Sin embargo, aproximadamente el 90% de las espumas de plástico se basan en alguna clase de agentes espumantes volátiles externos, las cuales se encuentran divididos en tres tipos:

a.1) **Compuestos orgánicos o inorgánicos.** Los cuales después de mezclarse con la resina, se descomponen al calentarse liberando un gas que provoca la expansión del plástico fundido.

La mayoría de los agentes espumantes orgánicos se basan en hidracinas y en la liberación de nitrógeno, en cantidades variables de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ . Las sales inorgánicas tales como el carbonato de sodio, el bicarbonato de sodio y el bicarbonato de amonio, así como algunos oxalatos que generan  $\text{CO}_2$ , no se usan muy a menudo; sin embargo, se usan como agentes nucleantes o algunas veces en combinación con pentano o nitrógeno. Los tres principales agentes espumantes son los siguientes:

- i) AZO compuestos
- ii) Sufonil hidracidas
- iii) Compuestos n-nitrosos

No obstante, los compuestos orgánicos, liberadores de nitrógeno, dominan el campo de los agentes químicos espumantes.

a.2) Gases que se inyectan al plástico. Los cuales lo expanden directamente cuando se libera la presión.

El agente gaseoso más empleado es el nitrógeno el cual es preferido por ser inerte, atóxico, inflamable y menos permeable en la mayoría de las resinas. Aunque el  $\text{CO}_2$  es menos permeable principalmente se ha empleado en la reacción del uretano, otros gases inertes no se usan porque no hay razón para ello.

La técnica de inyección directa de gas debe seleccionarse para condicionar el equipo e inyectar el gas en el lugar y momento precisos. Ya que si se inyecta demasiado pronto, el gas escapa; si se inyecta demasiado tarde, no se logra una buena dispersión.

a.3) Líquidos volátiles. Estos se inyectan como gas o líquido a la resina fundida, volatilizándose en el punto de ebullición formando células de gas en la resina. Idealmente, el agente espumante líquido es introducido después de haberse fundido el polímero (para que no haya escape del agente espumante) y antes de enfriarse. Esta inyección por lo general se lleva a cabo en la primer etapa a baja presión durante el proceso de extrusión.

Estos líquidos son numerosos, ya que existen bastantes hidrocarburos líquidos de bajo punto de ebullición, como son el propano, butano, pentano, hexano, heptano y benceno, que no han sido utilizados en gran cantidad a excepción del pentano.

## b) Agentes nucleantes

Generalmente, las estructuras celulares son deseables (principalmente en espumas de baja densidad), en ello influyen los agentes nucleantes. De estos existen dos clases:

b.1) Partículas de porcelana, que actúan en la ebullición del agua. Pueden utilizarse con los hidrocarburos volátiles y gases, hasta un 10% (generalmente del 0.3% al 5%) en peso de la resina.

Las que han sido utilizadas satisfactoriamente son el sulfato de bario, la arcilla, el talco, la tierra diatomácea y los pigmentos finamente divididos.

b.2) Agentes espumantes químicos, tales como el bicarbonato de sodio, el ácido cítrico o el citrato de sodio se usan con el pentano en la fabricación de las perlas de poliestireno expansible como auxiliares del agente espumante y nucleante. Estos agentes espumantes son introducidos con la resina a la tolva alimentadora, reaccionando cuando se introducen los gases al sistema.

### A.2.1.2.2) Diferentes tipos de espumas

A continuación se mostrarán los diversos tipos de espumas plásticas que se elaboran, así como algunas de sus aplicaciones.

## ESPUMAS TERMOPLASTICAS

### Espuma de ABS

Se utiliza en la fabricación de mangos para cubiertos, cajas, bandejas, artículos religiosos, perlas, botones, pulseras, marcos para cuadros, hebillas, estatuillas, buzones, muebles y radios. Principalmente en la industria transformadora de la madera.

### Espuma de copolímero de etileno

Se aplica como material de acojinamiento, para equipos de seguridad, equipos deportivos y automóviles.

Espumas ionoméricas	Adecuada para empaquetamiento, aislamiento, laminaciones metálicas y protección.
Espuma de polietileno de baja densidad	Se usa como material de sellado para evitar ruidos y humedad, acojinamiento y aislamiento térmico.
Espuma de polietileno de cadena Cruzada (Crosslinked)	Es adecuada para empaque, acojinamiento y de relleno.
Espuma de polipropileno	Se usa en la elaboración de engranes y objetos decorativos.
Espuma de poliestireno	Se aplica en la industria de la construcción, en el aislamiento de áreas de baja temperatura para almacenamiento, gabinetes de refrigeración, camiones y vagones refrigerados. En el mercado de empaque es usado en : charolas para carne, separadores de huevo y platos.
<b>Uretanos plásticos</b>	
Espumas vinílicas (por ejemplo PVC)	Se aplica en la industria aeronáutica, en cascos de barcos y en bloques de construcción.
Acrílico espumado	Se usa para componentes de bombas a la intemperies.
Espuma de policarbonato	
Nylon espumado	

## ESPUMAS TERMOFIJAS

Acetato de celulosa espumado	Se aplica en flotadores, salvavidas, boyas y en pequeñas embarcaciones.
Espuma fenólica (por reacción)	Con reforzamiento de fibra de vidrio, se usa en recipientes de uranio hexafluoroso y en empaque.
Espuma de uretano	Se usa en diversas áreas comerciales, que incluyen muebles, construcción, refrigeración, transporte y empaque.
Espumas flexibles	
Espumas semiflexibles y semirrígidas	Las espumas semiflexibles de uretano se usan en la industria automotriz en cubiertas de tableros, coderas y partes protectoras.
Espumas flexibles de poliéster	Se utilizan principalmente en textiles.
Espuma vinílica termofija	Se aplica en la construcción, aeronáutica, ferrocarriles y otras industrias.
Espumas epóxicas	
Espumas de alta densidad (base resina EPON 828)	Aislamiento térmico, alta resistencia química
Espumas de baja densidad	
Espumas uréicas	Una aplicación particular es en bases de arreglos florales.

**Poliéster espumado**

**Espumas elastoméricas**

**Silicones espumados**

**Hule silicón (RTV)**

**Esponja de espuma de silicón**

**Espumas minerales**

**Espumas sintéticas (resinas epóxicas vaciadas y resinas poliéster con microglobos de vidrio)**

**Tienen aplicaciones aeroespaciales y en flotadores para aguas profundas.**

**Espumas asfálticas**

**El uso de espumas como centro estructural ha sido y es ahora muy común, debido al reciente desarrollo de la tecnología de inyección, por lo que está aumentando claramente su uso. La alta productividad y el bajo costo han influido en el campo de aplicaciones de la industria automotriz y en la industria en general. Otra aplicación es en centros de esquies y raquetas de nieve, en los cuales el ensamble de las caras y los detalles son considerados en una cavidad cerrada, siendo la espuma inyectada, centro y adhesivo de unión para el precurado de enlace de la fibra de vidrio.**

**Las espumas de poliestireno no son usadas en estructuras sandwich, su papel principal es en partes estructurales de vehículos. Mientras que la espuma de cloruro de polivinil (PVC), se viene empleando como centro de pisos en la industria aeroespacial.**

Las estructuras sandwich, formadas con espumas han sido producidas y usadas por más de 25 años, sin embargo el uso de estos sistemas se ha visto siempre afectado por el problema continuo de la producción uniforme de propiedades de una mezcla a la otra, y en la obtención de alta uniformidad del centro y la resistencia de unión al material. Actualmente, el uso de inspección sistemática ascendente, un mezclado automático y un adecuado equipo de suministro han ayudado para mantener este problema bajo control.

En la tabla 5.3 se observa que la resistencia a cortante de varias espumas no esta listada, aun cuando este valor es indispensable para el diseño de los sandwich. Esta propiedad puede ser determinada para estos materiales y se puede considerar confiable, estimándola como 0.7 veces la resistencia a la compresión mostrada por la espuma.

Tipo	Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Resistencia a tensión MPa	Resistencia a Compresión MPa	Temperatura máxima de servicio °C	Conductividad térmica W/m K	Cortante Esfuerzo Módulo MPa
<b>ABS</b>						
Moldeado por inyección tipo pellets	641-897	13.8-27.6	15.8-25.5	80-82	0.08-0.30	
<b>Acetato de celulosa</b>						
Planchas y barras (Rígida, celda cerrada)	96-128	1.2	0.86	177	0.04	
<b>Epóxicas</b>						
Rígida de celda cerrada	80	0.35	0.62	177	0.04	
Bloques en preforma	160	1.2	1.8	177	0.04	
Láminas, chapas	320	4.5	7.4	177	0.05	
<b>Fenólicas</b>						
Espumas rellenas	5-24	0.021-0.12	0.014-0.10	0.21-0.28		
Resina líquida	32-80	0.138-0.372	0.15-0.58		0.03-0.04	
	112-160	0.552-0.896	1.09-2.07	145	0.03-0.04	
<b>Policarbonato</b>						
Pellets	801	37.9	51.7	132	0.15	
<b>Polipropileno</b>						
Espuma de alta densidad Parte moldeadas y formas con forro rígido	561	11.03	14.4		0.61	
<b>Poliuretano</b>						
Rígida de celda cerrada	21-48	0.10-0.65	0.10-0.41	82-121	0.2-0.4	0.14 1.56
Partes moldeadas	64-128	0.62-1.99	0.48-1.90	93-131	0.02-0.04	0.62 10.3
Placas, bloques	144-192	1.59-3.10	1.99-3.79	121-135	0.03-0.05	1.24 31.0
Lámina, tubo recubierto	208-288	3.28-4.93	4.48-7.58	121-149	0.04-0.06	
Espuma laminada en una, dos o tres superf.	304-400	5.34-8.96	8.27-13.8	121-149	0.05-0.07	3.1 103.5

Tabla 5.3 Propiedades de diversas espumas usadas en sandwich.

### A.2.1.3) Paneles

Los paneles generalmente se elaboran de los materiales siguientes: papel "Kraft", aleaciones de aluminio, papel de aramid, plástico reforzado con fibra de vidrio (hilos entretreídos), titanio y acero inoxidable unidos por adhesivos en tiras de material delgado.

Las propiedades físicas y mecánicas de los paneles se ven influenciados por las propiedades de los materiales de los cuales están fabricados, sin embargo las propiedades de los paneles son característicos de la geometría y pueden ser observados por separado, por ejemplo:

- Densidad: Las propiedades mecánicas aumentan conforme aumenta la densidad.
- Celda Superficial: Los paneles presentan propiedades anisotrópicas y aun cuando permiten una pequeña pérdida de la relación resistencia/peso, se puede dar una variación en la elaboración de las celdas conforme a las especificaciones o a ciertos materiales empleados, o verse alterados por el uso que se le vaya a dar (fig. 5.3).
- Tamaño de celda: Esta tiende a ser una variable secundaria, para muchas propiedades mecánicas de los materiales del núcleo.
- Espesor: Las propiedades a compresión y a cortante para un panel, se realiza sólo con métodos de prueba específicos, controlando cuidadosamente el espesor correcto del núcleo probado. Ya que al fallar en el espesor los valores se ven seriamente afectados y el factor de corrección puede ser considerablemente diferente, pues depende del material superficial y del espesor.
- Geometría de la muestra y métodos de prueba: Con el espesor especificado y controlándolo adecuadamente se podrán obtener valores similares a los ya obtenidos anteriormente, los métodos empleados para este tipo de materiales son las pruebas a cortante y a flexión. Ambos métodos son ampliamente aceptados.

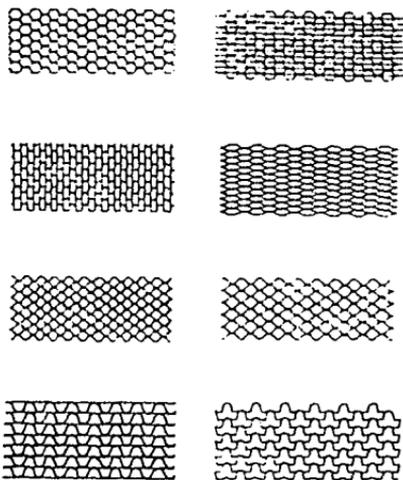


FIG 5.3 Varias configuraciones de celdas comunmente empleadas

#### A.2.1.3.1) Paneles de papel

El papel en forma de panal fue el predecesor de todos los tipos de paneles, producido desde hace casi 2000 años. Las primeras estructuras no fueron utilizadas como núcleos estructurales, sino como partes decorativas, hoy en día se ven como adornos temporales en tiendas departamentales.

Los materiales comunmente empleados como centros estructurales, son diversos y más resistentes que el papel "Kraft", así como la aplicación de un 11% a un 35% de resina fenólica, mejorando las propiedades mecánicas del papel, su resistencia a la humedad y a las bacterias.

Aunque el panel de papel ha sido empleado para vehículos aeroespaciales existen otras aplicaciones, por ejemplo: vehículos recreativos, puertas, paredes, tabiques, jaulas para gallinas, cuartos adicionales de casas habitación, cortinas de pared y en soportes de pared para edificaciones comerciales.

#### A.2.1.3.2) Panel de aluminio

Los paneles de aluminio se pueden formar principalmente por cuatro aleaciones, cinco tipos de celdas y varios espesores de hoja, para proveer un amplio rango de densidades. Las aleaciones comunmente empleadas son:

- 3003-H19      Da la más baja resistencia del grupo, usualmente para aplicaciones fuera de la aviación.
- 5052-H39      Es la más empleada en la aviación, se encuentra disponible con tratamiento superficial para la resistencia a la corrosión.
- 5056-H39      Tiene mayor resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.
- 2024-T3 ó T81      Presenta resistencia al calor y resistencia ligeramente superior en algunas propiedades que la 5056-H39. Disponible con tratamiento para mostrar resistencia a la corrosión.

Algunas de estas aleaciones están disponibles también como corrugados, corrugados y reforzados, sobre-expandido y en celda flexible; o en geometrías especiales (cilindros, esferas o cualquier configuración única).

El panel de aluminio es el más empleado como estructura por su versatilidad y por presentar la relación costo/rendimiento más favorable.

#### A.2.1.3.3) Panal de plástico (reforzado con fibra de vidrio)

Son generalmente usados en partes sensitivas a la electricidad o donde la resistencia a la temperatura y baja conductividad térmica sean una selección natural. Como matriz en servicio, para la retención de materiales ablativos no estructurales como la goma suave de silicio o la espuma epóxica rígida, que de otra forma no se habrían usado eficientemente como escudos al calor en los vehículos Géminis y Apolo.

#### A.2.1.3.4) Panal de papel de aramid

Este papel es flexible y resistente, generalmente de "Nomex" calandreado. El núcleo es expandido tanto en aluminio o en paneles de fibra de vidrio, bañado con resina fenólica o de cualquier otro tipo. Las propiedades mecánicas que presenta de alguna manera son menores que las del aluminio (especialmente en el módulo), posee la capacidad de soportar sobrecargas en áreas localizadas sin sufrir daño permanente. Esto se traduce como una gran resistencia aunada al bajo peso y se observa su uso en pisos de aeronaves, por lo que provoca que el material esté a la vanguardia a pesar de su alto costo. Además de utilizarse en aviones, también se emplea en cubiertas de botes, en esquies, en trineos de carreras, así como en otros productos.

El papel de aramid es relativamente incombustible y las bajas cantidades de material en el panel, resultan en un bajo volumen de humo y gases.

#### A.3) Materiales adhesivos

Los adhesivos aplicados en estructuras sandwich constituyen una familia diferente de materiales, que de aquellos que no requieren unir celdas abiertas con una lámina rígida y continua. Aún cuando estas diferencias son menos importantes con los nuevos materiales epóxicos modificados, algunos factores interesantes son discutidos a continuación.

#### A.3.1) Productos generados durante el curado

Algunos adhesivos producen vapores durante el curado, estos materiales secundarios presentan diversos problemas como son:

- . Presión interna: creando uniones pobres o ampollas.
- . Rompimiento de la estructura: debido a que el gas se abre camino en áreas de baja presión.
- . Movimiento de la estructura: resultado en parte de un curado ineficaz (a veces hasta de centímetros).
- . Corrosión subsiguiente de la estructura o la superficie: por la acción química de los vapores o por su condensado.

#### A.3.2) Presión de unión

Para prevenir la porosidad excesiva algunos adhesivos (por ejemplo las fenólicas), requieren de una presión mayor a la atmosférica. Algunas son perfectas para núcleos sólidos como la balsa, pero no se pueden utilizar en núcleos abiertos (panales o espumas). Ya que la mayoría de los núcleos no soportan altas presiones y por consiguiente no se pueden usar adhesivos que requieran de altas presiones.

#### A.3.3) Formado de la capa

Para lograr una buena unión en una celda abierta (panal), el adhesivo debe tener una combinación de mojado y de flujo controlado durante el curado. El flujo controlado previene el escurrimiento del adhesivo, evitando la formación de capas delgadas o gruesas abajo de la celda.

#### A.3.4) Adaptabilidad

Las condiciones mencionadas anteriormente, se encuentran vinculadas a los requerimientos de unión de superficie a superficie. Para el caso de superficies curadas, el

adhesivo debe ser un buen rellenedor de huecos sin pérdida de resistencia, debido a que el control de tolerancia en detalles es más difícil de lograr en los panales curvados que en los planos. Aunque es permitido cierto grado de tolerancia.

#### A.3.5) Control de la línea de unión

Es la capacidad del adhesivo para resistir la presión en las superficies cuando se ejercen presiones excesivas durante el curado. La mayoría de los adhesivos son formulados para lograr un buen filete, con un flujo controlado añadiendo una tela fibrosa sumergida en una capa delgada de adhesivo, que evita el escurrimiento bajo presión, lo que resultaría en una unión pobre.

#### A.3.6) Tenacidad

La prueba del tambor de despegue es la más comúnmente empleada para medir la tenacidad, ésta tiene la facilidad de poderse desarrollar y el valor obtenido es adecuado. Los valores obtenidos en la resistencia de despegue varían de acuerdo a:

- . La tenacidad del adhesivo
- . Cantidad del adhesivo usado
- . Densidad del núcleo
- . Tamaño de celda en el núcleo
- . Dirección de despegue (con o a través de la dirección de la cinta)
- . Preparación adecuada de la superficie
- . Degradación de la superficie de adherencia después de unida

#### A.3.7) Tipos de adhesivos disponibles en el mercado

- Fenólicas Combinadas con Vinilos, goma o epoxi: Son empleadas donde la alta resistencia, durabilidad o propiedades mecánicas a altas temperaturas son esenciales.

- Epóxicas modificadas con nylon u otro polímero poliamídico: Provee excelente adherencia.
- Epóxicas modificadas con nitrilo: Proveen resistencia a la humedad, soportan una temperatura de 149 °C y esfuerzos cortantes de 34,500 KPa.

++- Uretanos

++- Otras poliamidas, termoplásticos y adhesivos especiales: sus aplicaciones son variadas, hasta una temperatura de servicio de 371 °C. Los adhesivos químicos se categorizan y agrupan de acuerdo a la forma en que están disponibles, generalmente como sigue:

- . Líquidos ligeros, líquidos pesados, pastas, masillas o espumas sintéticas.
- . Cintas de soporte, formadas con: fibra de vidrio, algodón, cubierta de Poliéster ó fibra sintética hilada.
- . Cintas sin soporte, conteniendo sólo el adhesivo sin carga.
- . Cintas reticuladas.
- . Adhesivos para el borde de la celda.
- . Cintas auto-adhesivas.

#### A.4) Diseñando un sandwich

El objetivo principal del diseño de las estructuras sandwich es reducir peso, incrementar dureza o usar menos material, el cual es costoso. Algunas veces se persiguen otros objetivos, tales como la reducción de maquinado u otros costos, obtener baja resistencia aerodinámica, reducción en el reflejo de ruido (aumentando la durabilidad bajo exposición acústica).

El problema para el diseño se reduce a la consideración de cargas internas, extraerlas y unir las a pequeños o grandes miembros transmisores de carga bajo fuerzas de deflexión, contorno, peso y costo. A continuación se dan algunas sugerencias para lograr un buen diseño.

- 1) **Entender la secuencia y métodos de fabricación.** La etapa de diseño se encuentra unida al costo de la estructura y una diferencia considerable en el resultado del costo, son las alternativas de solución del problema. Por ejemplo, en la figura 5.4 se muestran dos materiales que realizan el mismo trabajo, pero si el canal es colocado con las puntas hacia afuera, se obtendrá un ahorro de material.

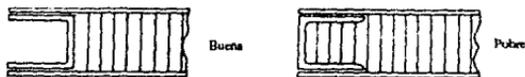


FIG 5.4 Fabricación adecuada para el ahorro de material

- 2) **Usar el núcleo correcto.** El empleo de núcleos de diferentes densidades se puede dar en el mismo panel, cada una con la característica de soportar carga, unidas con adhesivo como se muestra en la figura 5.5. Sin embargo, en muchos casos el peso ahorrado en las áreas de baja densidad es añadido en forma de peso por el adhesivo.

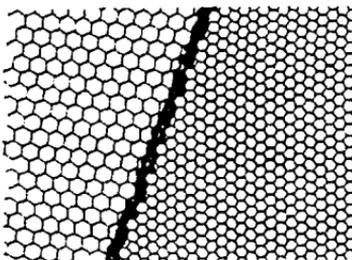


FIG 5.5 Empalme típico de centros usando una espuma adhesiva

- 3) **No dudar para usar métodos de unión diferentes en la misma pieza.** En la unión de sandwich se incluyen la soldadura, la forja, ensambles ribeteados o ensambles de unión. En los adhesivos disponibles que permiten uniones secundarias, existen los que pueden ser aplicados desde los 16°C hasta los 177°C, sin llegar a degradar la capacidad de unión.
- 4) **Usar tornillos y remaches para soportar cargas.** Cuando no existe espacio disponible para realizar dobleces progresivos de unión, la adición de tornillos o remaches puede ser la única solución para estos casos. Sin embargo, su empleo puede traer como resultado una baja resistencia a la fatiga y un aumento en peso.
- 5) **Emplear pliegues donde se necesiten, en lugar de una lámina sobre la pieza.** El uso de pliegues, aún cuando es un costo adicional de mano de obra, siempre mejora la calidad de la pieza obtenida. Para las superficies formadas de vidrio o grafito pretreatado, el problema es menor, ya que los pliegues extras se añaden para soportar cargas mayores donde y cuando sea necesario.
- 6) **Usar pliegues externos en lugar de internos donde sea posible.** El uso de pliegues internos significa que usualmente un corte de alivio debe hacerse en las estructuras para prevenir un inicio y una desunión consecuente donde el doblez termina. Aunque algunas veces una capa externa de adhesivo es añadida para ayudar.

#### A.4.1) Análisis estructural para casos específicos

Las notaciones listadas a continuación, son empleadas en las fórmulas de diseño de estructuras en forma de sandwich<sup>1</sup>.

D = Flexibilidad (rigidez);  $D = E_T t_f h^2 / 2 \lambda_f$

$E_c$  = Módulo de elasticidad del panel (Pa)

$E_T$  = Módulo de elasticidad de las caras (Pa)

<sup>1</sup>Estas fórmulas son sólo para paneles en viga y columna, las cuales tienen la misma superficie de cada lado de la estructura.

$G_c$  = Módulo a cortante de la rigidez del panel (Pa)  
 $K_b$  = Constante de la curvatura de deflexión  
 $K_s$  = Constante de deflexión a cortante  
 $L$  = Longitud de la viga o altura de la columna (mm)  
 $M$  = Momento máximo (amplitud  $m=Kg/m$ )  
 $P$  = Carga (Kg)  
 $P_{cr}$  = Carga crítica de la columna (Kg/m)  
 $P_y$  = Carga máxima de la columna (Kg/m)  
 $V$  = Amplitud de la fuerza máxima de corte (Kg/m)  
 $d$  = Espesor total del sandwich (mm)  
 $h$  = Distancia entre centros de las superficies (mm);  $h=t_c+t_f$   
 $s$  = Tamaño del núcleo de la celda (mm)  
 $t_c$  = Espesor del núcleo (mm)  
 $t_f$  = Espesor de la superficie (mm)  
 $w$  = Carga uniforme de la viga (Pa)  
 $\Delta$  = Deflexión máxima de la viga (mm)  
 $\lambda_d$  = 1- coeficiente de Poisson del material de la superficie al cuadrado  
 $\quad = 1-\mu^2$   
 $\mu$  = Coeficiente de Poisson del material de la superficie  
 $\sigma_y$  = Esfuerzo producido por el material de la superficie (Pa)  
 $\sigma_f$  = Esfuerzo máximo de la superficie (Pa)  
 $\tau_{c-c}$  = Esfuerzo de compresión máxima del núcleo (Pa)  
 $\tau_{cs}$  = Esfuerzo cortante máximo del núcleo (Pa)  
 $b$  = Espesor de la viga(mm)

#### A.4.2) Requisitos de diseño

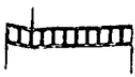
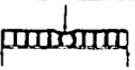
El diseño de la estructura sandwich, se hará en base al criterio estructural básico listado a continuación, en condiciones bajo carga.

- 1) Las caras serán lo suficientemente gruesas para resistir la tensión, la compresión y los esfuerzos a cortante inducidos por la carga de diseño.

- 2) El núcleo tendrá la suficiente resistencia para soportar las tensiones a cortante inducidas por las cargas de diseño.
- 3) El núcleo puede ser lo bastante grueso y tener un módulo a cortante capaz de prevenir sobre todo el pandeo del sandwich bajo carga.
- 4) El módulo a compresión del núcleo y la resistencia a la compresión de las caras pueden ser suficientes para prevenir el arrugamiento de las caras bajo la carga de diseño.
- 5) Las celdas del núcleo serán lo suficientemente pequeñas para impedir la formación de cavidades intracelulares de las caras bajo la carga de diseño.
- 6) El núcleo tendrá suficiente resistencia a compresión para soportar el aplastamiento por las cargas de diseño actuando en dirección normal a las caras del panel o por esfuerzos a compresión inducidos por flexión directa.

#### A.4.3) Modos de falla

Los modos típicos de falla en estructuras sandwich, se observan en la figura 5.6

<p><b>FALLA DE LA SUPERFICIE</b> La falla inicial puede ocurrir en las caras por compresión o tensión. Causada por insuficiente espesor o resistencia de la superficie</p>	 <p>Falla a tensión</p>	$\sigma_t = \frac{M}{I_y b b}$
<p><b>FALLA A CORTANTE TRANSVERSAL</b> Causada por una insuficiente resistencia a cortante del centro o espesor del panel</p>		$\tau_v = \frac{V}{h b}$
<p><b>APLASTAMIENTO LOCAL DEL CENTRO</b> Causada por una baja resistencia a la compresión del centro</p>		$\sigma_c = \frac{P}{A}$

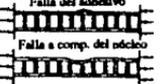
<b>PANDEO</b> Causado por espesor insuficiente del panel o insuficiente rigidez del núcleo		$P_{cr} = \frac{K\pi^2 D}{L^2 + \frac{\pi^2 D}{12G_c}}$
<b>TORCIMIENTO A CORT.</b> Causado por un bajo módulo a cortante del núcleo o baja resistencia a cortante del adhesivo		$P_{cr} = \tau_c G_c$
<b>ARRUGAMIENTO DE LA CARA</b> Se crea por la base elástica de la placa. Puede ser hacia afuera o adentro dependiendo de la resistencia del núcleo.		$P_{cr} = 1.644 E_f \left[ \frac{E_f t_f}{E_c t_c} \right]^{1/2}$
<b>RIZOS INTRACELULARES</b> Este efecto causa falla por propagación a través de las células adyacentes provocando el arrugamiento de las caras		$P_{cr} = \frac{4 t_f E_f}{\lambda_c} \left[ \frac{t_f}{s} \right]^2$

FIG. 5.6 Modos de falla en estructuras sandwich

#### A.4.4) Pasos de diseño

A continuación se muestran en forma secuencial los pasos sugeridos para llevar a cabo el diseño de un sandwich.

- 1) Definir las cargas. En base a el área de contacto.
- 2) Definir el tipo de viga. Los valores de la figura 5.7 proporcionan el punto de partida para estos cálculos. La deflexión calculada siempre será menor debido a que en la práctica no se logra la firmeza de la pieza.
- 3) Determinar los límites de deflexión. Para muchas aplicaciones la deflexión permisible se limita a  $L/360$ , aunque en algunos casos se puede tener una deflexión mayor como por ejemplo en los esquies de nieve, donde deflexiones muy grandes pueden ser normales en función de la estructura.

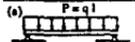
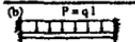
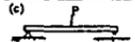
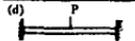
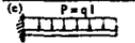
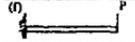
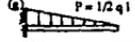
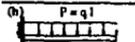
TIPO DE VIGA	Máxima fuerza a constante V	Momento máximo M	Constante de deflexión $K_p$	Constante de deflexión a constante K	
(a) 	$\frac{P}{2}$	$\frac{PL}{8}$	$\frac{5}{384}$	$\frac{1}{8}$	(a) Apoyo simple y Carga uniforme
(b) 	$\frac{P}{2}$	$\frac{PL}{12}$	$\frac{1}{384}$	$\frac{1}{8}$	(b) Ambos extremos empotrados y carga uniforme
(c) 	$\frac{P}{2}$	$\frac{PL}{4}$	$\frac{4}{192}$	$\frac{1}{4}$	(c) Simplemente apoyada y carga al centro
(d) 	$\frac{P}{2}$	$\frac{PL}{8}$	$\frac{1}{192}$	$\frac{1}{4}$	(d) Ambos extremos empotrados y carga al centro
(e) 	P	$\frac{PL}{2}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{2}$	(e) Cantiliver y carga uniforme
(f) 	P	PL	$\frac{1}{3}$	1	(f) Cantiliver y carga en el extremo
(g) 	P	$\frac{PL}{3}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{3}$	(g) Cantiliver y carga triangular
(h) 	$\frac{5P}{8}$	$\frac{PL}{8}$	$\frac{1}{185}$	$\frac{1}{142}$	(h) Un extremo empotrado, otro simplemente apoyado y carga uniforme

FIG 5.7 Tipos de vigas

- 4) **Selección del material de las caras.** En la selección del material debido a que se incluyen consideraciones como: el peso deseado, posible uso, cargas locales (diferentes), corrosión o limitaciones decorativas. La selección del espesor estandar y el inicio de los cálculos se consideran posteriormente, el espesor del revestimiento afecta directamente al esfuerzo de deflexión de la superficie.
- 5) **Haciendo la primera aproximación.** El primer espesor "h" del sandwich, se determina seleccionando  $t_f$  y  $E_f$  para llegar a valores deseables o prácticos de "h". En muchas estructuras en forma de sandwich de uso común, el rango de espesores va de 1.5mm a 150mm.

- 6) **Selección del espesor de las caras.** Considerando que materiales tales como los paños de fibra de vidrio y el aluminio están disponibles en estándares específicos de espesor, se selecciona el espesor de las caras y se verifica a tensión, se emplea la fórmula para  $\delta_f$  y se determina un factor de seguridad.
- 7) **Selección del núcleo.** Se calcula el esfuerzo a cortante del núcleo  $\tau_{c-c}$ , después de haber hecho una selección preliminar del material, observándose que la resistencia del núcleo no es la misma en todas direcciones. Para mejorar la selección, se toman en cuenta las condiciones de compatibilidad, tamaño y tipos de celda, determinando las correcciones necesarias para considerar los efectos del espesor en la resistencia. Se checa el factor de seguridad usando el esfuerzo calculado y el esfuerzo permisible corregido.

Otras consideraciones involucran la resistencia a la compresión, el módulo a cortante, el peso y los costos, por ejemplo: para las cargas en una rueda, la fuerza de aplastamiento y el espesor de la cara son a menudo la consideración más importante.

- 8) **Chequeo de la deflexión.** Para muchas aplicaciones, el cálculo de la deflexión esperada omite la parte de la flexión a corte, con una pequeña limitación de la deflexión en un sandwich muy denso o con un espacio muy corto, la componente a cortante puede ser calculada y la selección del núcleo puede ser influenciada por el módulo a cortante requerido.
- 9) **Cara plegada y hoyucos intracelulares.** Una falla local de la cara en pandeo puede ser encontrada con capas delgadas, donde una restricción en el  $\tau_{crit}$  determinará si ésta puede ser una consideración de diseño.
- 10) **Otras consideraciones.** Frecuentemente los entrepaños de los panales están soportados en más de dos lados, por lo que si la relación de longitud/ancho es mayor de 3:1, los cálculos son adecuados al usar el espacio corto, diseñándolas como viga. Las fórmulas de "**Roark**" son útiles donde la flexión a cortante puede ser ignorada, empleando las fórmulas siguientes.

$$I_{\text{sandwich}} = \frac{t_f h^2 b}{2}$$

;

$$I_{\text{sólido}} = \frac{bt^3}{12}$$

así, para los cálculos de la placa.

$$I_{\text{sólido}} = 6t_f h^2$$

El uso de estas fórmulas para la deflexión pueden dar valores más bajos que los experimentados actualmente, por lo tanto la deflexión a cortante puede ser importante.

#### A.4.5) Fórmulas simples las cuales pueden ser usadas

a) Aplicando el esfuerzo en las caras

$$\sigma_f = M/t_f h$$

(donde M es determinado por la figura 5.7)

b) Esfuerzo cortante en el núcleo

$$\tau_{cs} = V/h$$

(donde V es determinado de la figura 5.7)

c) Deflexión

$$\Delta = \frac{2K_B PL^3}{E_f t_f h^2} + \frac{K_S PL}{hG_c}$$

( $K_B$  y  $K_S$  de la figura 5.7)

Para muchas vigas, el segundo término es relativamente pequeño, pero puede ser checado si la deflexión es crítica o el tramo es corto.

d) Momento de inercia

$$I_{sw} = \frac{t_f h^3 b}{2}$$

e) Cara con hoyuelos

$$\sigma_{crit} = \frac{2E_f |t_f|}{\lambda \cdot s}^2$$

f) Cara arrugada

$$0.82 \sigma_{crit} = E_f \frac{E_c t_f}{E_f c}^{1/2}$$

g) Factor de seguridad

$$F.S = \frac{\text{Esfuerzo admisible o típico}}{\text{Esfuerzo calculado}}$$

#### A.5) Elaboración de estructuras sandwich

La elaboración de estructuras sandwich requiere de tres condiciones para su construcción: (1) La aplicación de presión y temperatura (ambos requeridos en cantidades precisas para el curado del adhesivo), (2) el suministro de herramientas y accesorios de apoyo para el ensamble de la superficie deseada y (3) el cuidado de todos los detalles en su posición durante el curado. Existen diversas condiciones de suministro que son comúnmente usadas, por ejemplo: Las bolsas de vacío o simples prensas para autoclaves y unidades de herramientas, donde el volumen y la complejidad puedan justificarlos. La

mayor parte de los equipos empleados son similares a los equipos de producción de las estructuras unidas, como en los plásticos reforzados. Sin embargo, la unión de las estructuras sandwich siempre se realiza a una presión más baja que la unión estructural, la cual no presenta un núcleo de baja densidad, resultando en un bajo costo de maquinado.

A continuación se listan algunas sugerencias para facilitar la solución del problema de unión en los sandwich.

- 1) Asegurarse que el núcleo sea del tamaño apropiado al espacio que ocupará. Si se ha estirado un poco para cubrir la distancia, posteriormente se contraerá al inicio del proceso de curado, generando vacíos en las orillas de las piezas, teniendo como resultado áreas sin unión.
- 2) Si el núcleo de un panel está siendo usado, hay que recordar que el adhesivo entre el núcleo y las caras terminará siendo más delgado que el mismo adhesivo entre los extremos y las caras. Por esta razón, es común requerir que el núcleo sea 0.25mm más ancho que las partes sólidas contiguas de la misma unión.
- 3) Las elevadas temperaturas que requieren muchos adhesivos para el curado son a menudo medidas inadecuadamente. Hay que considerar que sólo el adhesivo siendo curado puede dar la temperatura adecuada que se dará como base para su aplicación.
- 4) La mayoría de los adhesivos fluyen cuando se inicia el ciclo de curado, en este momento la línea de unión cambia su espesor sustancialmente, ya que muchos de los adhesivos son débiles y frágiles al haber un cambio de fase.
- 5) Para evitar la deformación (dilatación térmica) de la estructura debida a una diferencia de temperaturas entre las caras, deberá incrementarse lentamente la temperatura para lograr una mejor distribución de calor.

- 6) Habrá que proporcionar una ruta segura de escape de las trampas de aire o gases encerrados durante el curado, esto es importante para partes realizadas a vacío en autoclave, por medio de un paño purgador empleado en el recipiente. Para ensambles complejos se deben colocar varias líneas de vacío en diferentes puntos del recipiente con monitoreo de la presión.
- 7) Las mallas a menudo ayudan colocándose en la parte superior del ensamble que contiene diferentes piezas como núcleo, insertos y bordes entre otros, de modo que este delgado torro no presione cada detalle y dé como resultado una desigualdad en la superficie exterior. Generalmente esta placa no debiera ser mayor de dos o tres veces el espesor de las caras del sandwich, ya que el espesor de las mallas es usado como control dimensional en el ensamble para una mejor respuesta de la estructura.
- 8) Asegúrese que el núcleo, el precurado o de bordes rígidos, los injertos, forros y otros detalles relacionados en el ensamble del método de contacto (lay up), tengan un estricto control dimensional que permita obtener la resistencia óptima de los adhesivos o de las resinas.

#### A.6) Elaboración del núcleo

Cuando los materiales metálicos del núcleo tienen que ser cortados, desbastados, tallados o formados, muchas herramientas pueden ser utilizadas. Mientras que para los núcleos no metálicos, generalmente tienen que ser formados con calor. En uno u otro caso, el formado es más fácil que el uso de una celda configurada.

## B) Compuestos híbridos

Para que un avión fuera capaz de despegar, atravesar la atmósfera y el espacio a velocidades hipersónicas y seguir sin inconvenientes tras entrar de nuevo en la atmósfera para aterrizar en su destino como un avión convencional, se tuvo que haber superado una prueba decisiva de los materiales estructurales (fig. 5.8). Para colocarse en órbita con la sola ayuda del carburante, se necesitó de una estructura construida de materiales livianos, rígidos y resistentes, capaces de soportar grandes tensiones aerodinámicas.

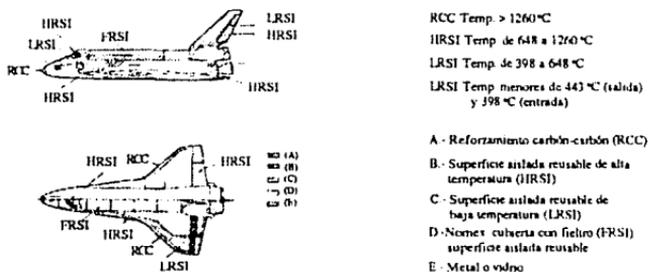


FIG 5.8 Sistema de protección térmica del transbordador espacial

Actualmente en el diseño de materiales se ha dado un gran avance tecnológico en la construcción de estructuras y determinados elementos de los motores que constituyen las aeronaves, estos materiales son los materiales híbridos. La necesidad de conjugar rigidez y resistencia con baja densidad ha llevado a los ingenieros aeronáuticos, diseñadores de artefactos deportivos e ingenieros en general a recurrir a los materiales híbridos para alguna aplicación.

Los compuestos híbridos son materiales que combinan dos o más fibras en el mismo laminado, generalmente para proveer una propiedad que se considera deficiente en una fibra sola (por ejemplo: la resistencia al impacto de los compuestos de grafito o la dureza de los compuestos de vidrio), o bajar costos (por ejemplo: sustituyendo fibras de

vidrio por las de grafito en direcciones críticas-blandas o porciones de la estructura). Una de las técnicas para disminuir costos, es el usar una mezcla de fibras de alto rendimiento en lugares más eficientes para soportar cargas y esfuerzos. Un ejemplo se observa en la mezcla de fibras de vidrio con fibras de grafito en una matriz de resina para la elaboración de álabes de una turbina de avión, teniendo como resultado un incremento de la resistencia al impacto con una reducción en costo.

El número de posibles combinaciones con materiales y la diversidad de las propiedades obtenidas con los compuestos híbridos son muchas. Así en forma general, el estudio de los híbridos de acuerdo a los tipos, propiedades típicas y la razón fundamental de uso se han dividido en cinco, los cuales son:

- 1) "Aleatorios": Las fibras son mezcladas aleatoriamente a través de la resina, compuesta sin alguna concentración preferencial de fibras.
- 2) "Intraply": Las fibras se combinan en forma regular en cada lámina del compuesto, ya sea en forma entretrejida o en tapete híbrido, sin embargo, cada lámina puede ser diferente.
- 3) "Interply": Compuesto consistente de capas de una sola fibra en forma discreta (ejemplo: un tubo con una capa de grafito y otra capa de vidrio-epoxi).
- 4) Reforzamientos selectivos
- 5) Los llamados "superhíbridos": formados de láminas de compuesto de resina y láminas de metal apiladas en una secuencia específica.

Los híbridos comúnmente empleados y de los cuales se tienen más datos son los intraply y los interply; por lo general tienen la misma matriz y son fabricados con el proceso de precurado. La matriz actúa como conglomerante, uniendo las fibras y proporcionando solidez al material. También las protege de las tensiones del entorno y de daños físicos que pudieran provocar la aparición de grietas.

La resistencia y rigidez de los híbridos se deben en gran parte, al reforzante, sin embargo la matriz contribuye a definir otras propiedades, por ejemplo: la conductividad térmica y la eléctrica están estrechamente condicionadas por la conductividad de la matriz, mientras que el comportamiento mecánico se rige no sólo por las fibras, sino por el efecto sinérgico entre las fibras y la matriz.

### B.1) Fabricación

La elección de la matriz determina el proceso de elaboración del híbrido. Al fabricar un híbrido de matriz polimérica, las fibras, normalmente en forma de hilos o haces, se insertan en la matriz de resina. Agrupándose en cintas o láminas, que se ensamblarán a mano para formar una estructura laminada. Las fibras incluidas pueden aplicarse también directamente sobre un objeto por el proceso de "arrollamiento de filamentos".

Los híbridos a menudo deben soportar altas temperaturas y presiones durante muchas horas, por lo que las temperaturas de fusión o degradación de una matriz polimérica exigen otro tipo de material para la matriz y generalmente suele tratarse de un metal. Además de la resistencia a la temperatura, la matriz metálica ofrece otras ventajas. Su mayor resistencia mecánica complementa la de las fibras que la refuerzan; su ductilidad proporciona tenacidad al material híbrido. Mas éste tipo de matriz conlleva dos problemas: Una densidad superior en comparación con los polímeros, aun cuando los metales ligeros como el aluminio, magnesio y titanio constituyen las matrices habituales con una mayor complejidad.

Mientras la fabricación de híbridos con matriz polimérica se ha convertido en rutina, el desarrollo de los híbridos con matriz metálica ha sido más lento, debido en parte a las condiciones extremas en las que hay que llevar a cabo el proceso de inclusión de las fibras en la matriz metálica. Es obvio que la inclusión de un haz de fibras en metal fundido reclama temperaturas elevadísimas, teniendo implícito el riesgo de inducir reacciones en las interfaces: reacciones químicas entre fibras y matriz. Si las reacciones tienen lugar en una capa delgada pueden servir para unir las fibras y la matriz, pero si los productos de la reacción forman una capa más gruesa debilitará el enlace y degradará tanto a las fibras como a la matriz. Para solucionar estos problemas se han desarrollado otras técnicas que admiten temperaturas más bajas, como por ejemplo: la unión por difusión.

Algunas de las aplicaciones de los híbridos con matriz metálica se observa en las zonas frías de un avión supersónico. Ahora bien, en la proa, bordes de ataque de las alas o en los motores, la temperatura podría rebasar el punto de fusión de la matriz metálica. Para estas zonas se ha estudiado la posibilidad de emplear un material híbrido con matrices tan resistentes al calor como las propias fibras, dando lugar a las matrices cerámicas.

En razón de su fragilidad, los cerámicos se comportan en forma distinta a otras matrices, una matriz cerámica ya es suficientemente rígida y resistente, por lo tanto para obtener una mejor eficiencia habrá que aumentar su tenacidad. Las fibras solucionan este problema bloqueando el crecimiento de las grietas, así si una grieta en crecimiento se encuentra con una fibra puede tomar un camino desviado o separar la fibra de la matriz. Ambos procesos absorben energía, retrasando el avance de la grieta, debido a que una madeja de fibras anula los efectos de las grietas.

Otra propiedad que la matriz cerámica confiere a los híbridos es su gran resistencia a la temperatura, por ejemplo: un vidrio de borosilicato con fibras de carburo de silicio mantiene su resistencia a 1000°C, así como las matrices de carburo de silicio, nitruro de silicio y óxido de aluminio o mulita (compuesto de aluminio, oxígeno y silicio), permiten tenerlas en servicio a temperaturas de 1700°C. Muchos híbridos de matriz cerámica adquieren mayor tenacidad (y por tanto mayor resistencia) a medida que sube la temperatura. Ya que entre los grados cristalinos que forman muchos cerámicos aparecen regiones vítreas, que se ablandan a altas temperaturas y actúan deteniendo el avance de las grietas.

La resistencia al calor de los híbridos de matriz cerámica dificulta su elaboración, ya que no resulta práctico fundir los cerámicos y generalmente se les da forma consolidando los polvos del cerámico en cuestión a altas temperaturas y presión mediante el proceso de sinterización. Las matrices de vidrio permiten usar técnicas convencionales ya que pueden ablandarse e insertar las fibras en el vidrio viscoso muy caliente para luego prensarlos y formar la estructura del híbrido.

## B.2) Selección de las fibras reforzantes

Todos los elementos reforzantes son resistentes, pero difieren en diversos aspectos. La resistencia a la tracción de las fibras de vidrio iguala o supera la de las fibras de grafito, sin embargo sufren cierto aumento de longitud cuando se someten a grandes tensiones. Por tanto, Los híbridos reforzados con vidrio no son adecuados para aplicaciones en las que la rigidez constituye una propiedad decisiva.

Algunos reforzantes son más indicados que el grafito para los casos en que se busque un material de resistencia al choque; por lo tanto, el reforzante del híbrido tendrá que ser de fibras poliméricas o de aramid, aunque tenaces, menos rígidas.

Los reforzantes han de adecuar su naturaleza a sus funciones mecánicas y químicas. Un primer requisito es soportar las condiciones del proceso exigidas por la matriz. La compatibilidad química entre las fibras y la matriz es esencial en las zonas de contacto (la superficie de las fibras). En los híbridos de matriz metálica o polimérica debe producirse un enlace entre el reforzante y la matriz para que actúen conjuntamente. Lo primero que la adherencia necesita es que la matriz en su forma fluida, sea capaz de humedecer las fibras. Si la matriz fuera incapaz de mojar las fibras, éstas podrían recibir un recubrimiento que al interactuar a la vez con la fibra y la matriz, fomenta el contacto. En algunos casos, variando la composición de la matriz se puede favorecer este proceso. Una vez que la matriz empapa las fibras se puede establecer un enlace de las fuerzas intermoleculares o alguna reacción química.

## B.3) Propiedades

Las propiedades de un material híbrido dependen del tipo de matriz, el material reforzante que contenga y un tercer factor: la geometría del refuerzo. Aunque en algunos casos, la geometría no sigue ningún patrón. Los metales reforzados por dispersión constituyen un tipo de material híbrido donde sólo se controla la concentración de las partículas endurecedoras, lo mismo sucede con muchos híbridos que contienen fibras cortas.

Dos razones explican por qué los híbridos de alta resistencia se endurecen con fibras más largas, generalmente formando un hilo continuo. Si en el material híbrido se quiere aprovechar la alta resistencia del reforzante, éste debe ser capaz de soportar tensiones hasta el límite de la ruptura. De lo contrario, el híbrido fallará ante una carga inferior a la tensión que las fibras pueden soportar teóricamente y se separan de la matriz sin romperse a medida que el híbrido va desintegrándose.

Puesto que la carga se transmite de la matriz a las fibras reforzantes a través de fuerzas a cortante que actúan sobre su superficie, el área superficial deberá ser grande en relación con el área transversal (longitud crítica). La segunda razón por la que las fibras continuas han alcanzado un lugar importante en el reforzamiento es el control preciso de su orientación. Así, la estructura interna del material puede ser diseñada con vistas a las tensiones que soportará en su uso real.

La geometría interna de los materiales híbridos convencionales se parece a la de la madera contrachapada, formados de varias capas delgadas, reforzada cada una por fibras continuas alineadas en una dirección.

Para el endurecimiento de los materiales híbridos en muchas direcciones a la vez y aumentar su resistencia al choque, se utilizan las fibras entretejidas de diversas formas: trenzadas, anudadas o entrelazadas (Fig.5.9). La elección de una disposición determinada la impone el costo, la resistencia direccional y la flexibilidad. Un trenzado sencillo endurecerá el material en las direcciones de la trama y la urdimbre del tejido. Los tejidos complejos, más caros, ofrecen en contrapartida, resistencia a lo largo de direcciones intermedias. Con algunos tipos de punto se consigue un tejido elástico que confiere mayor tenacidad, a costa de perder cierta rigidez. Para eliminar las direcciones en que el material en conjunto es débil, se puede aportar al reforzamiento una estructura dimensional.

Muchas de las propiedades que influyen en las posibilidades de uso del material vienen determinadas por el comportamiento promedio de las fibras y la matriz. Entre tales propiedades se cuentan la rigidez, conductividad térmica, coeficiente térmico de expansión y el módulo de Poisson (grado en que un material se contrae lateralmente al ser estirado).

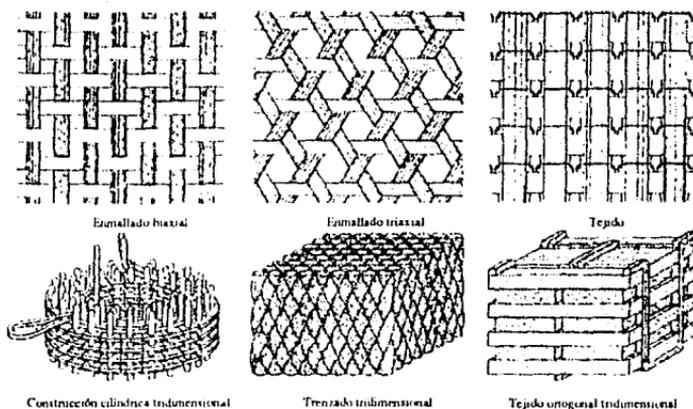


FIG 5.9 Diversos tipos de entretejidos del material reforzante de los compuestos híbridos

Existe una gran cantidad de datos generados de las propiedades a tensión e impacto de los híbridos, pero no hay datos sobre las propiedades térmicas, efectos de la humedad y efectos residuales de tensión. Los métodos de análisis de estructura y esfuerzo, procedimientos de diseño, métodos de fabricación y técnicas de control de calidad que son usadas para compuestos convencionales son también empleados para los híbridos.

## Capítulo 6

# Reforzamiento de Polímero-Cerámico

### **A. Introducción**

En el presente capítulo hablaremos de las propiedades y características de los elementos que conforman el material compuesto que desarrollaremos experimentalmente. Como se mencionó anteriormente la aplicación de este material se busca que sea en partes estructurales, donde se requiere una alta resistencia con bajo peso, por lo tanto los materiales seleccionados para cumplir este objetivo son: resina epóxica y fibras de grafito base PAN.

En un compuesto formado con fibras de grafito (reforzante) y resina epóxica (matriz), las fibras contribuyen con sus propiedades de tracción para dar resistencia y rigidez, mientras que la matriz proporciona propiedades tales como resistencia a la corrosión y resistencia al impacto.

A continuación se analizarán los materiales que conforman el material compuesto, tocando el proceso de elaboración de estos, lo cual es importante para poder entender algunas de las propiedades mecánicas que se presentan en ellos.

### A.1) Fibra de grafito base PAN

El uso del Poliacrilonitrilo PAN como material precursor de fibras de grafito se reportó por Tsunada en 1960 por primera vez, revelando que las fibras podían ser procesadas del precursor PAN por un cruzamiento de enlaces -o estabilización- del polímero en una atmósfera oxidante a 220°C y un tratamiento térmico a 1000°C, estabilizándola en una atmósfera inerte, las fibras así elaboradas mostraron propiedades muy pobres.

Un año después se mostró una variación en la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad de las fibras elaboradas con un tratamiento térmico (Shindo). Los valores que se reportaron entonces fueron del rango de los 550MPa-690MPa para la resistencia a la tracción, mientras que los módulos de elasticidad fueron de 170GPa. Para el año de 1966, se reportaron valores de 480GPa para módulos de elasticidad y 2070 MPa para la resistencia a la tracción. Estos módulos de elasticidad fueron debidos a la tracción aplicada a las fibras durante una etapa temprana de su preparación. A partir de entonces, se han reportado una gran cantidad de patentes para la elaboración de fibras de grafito base PAN como precursor. Donde básicamente todos estos procesos involucran el estiramiento del precursor PAN para obtener un alto grado de orientación molecular del polímero, para después someterlo a un tratamiento de estabilización en una atmósfera en la cual las fibras son mantenidas bajo tracción. Posteriormente, las fibras son carbonizadas en un rango de temperaturas de 1000°C a 3500°C.

#### A.1.1) Proceso de conversión del PAN

Actualmente el proceso por el cual el PAN es convertido en fibras de grafito involucra los siguientes pasos.

- 1) Hilado del precursor
- 2) Distensión del precursor
- 3) Estabilización a 220°C en aire, bajo tracción
- 4) Carbonización a 1500°C en atmósfera inerte
- 5) Grafitización a 3000°C en atmósfera inerte

Antes de abordar estos pasos, resulta importante la explicación de las características y de los copolímeros del PAN.

El poliacrilonitrilo PAN es un polímero lineal fijo, que consiste de una columna carbón-hidrógeno con enlaces polares carbón-nitrógeno (nitrilos), sujetos en grupos de medallones. Se muestra en la figura 6.1 una molécula ideal de PAN. Las propiedades físicas del polímero se ven afectadas significativamente por la polaridad de los grupos nitrilos, por ejemplo: la temperatura de transición de segundo orden (transición vítrea) del PAN, la cual es alta -del orden de los 120°C- debida principalmente a la fuerte unión intermolecular. Por esta razón, en la elaboración de fibras, el PAN es copolimerizado con otros monómeros, tales como el metilacrilato (una combinación del 94% PAN y 6% metilacrilato) o vinilacetato. Estas bajas adiciones de vidrio a temperaturas de transición, permiten alcanzar la elaboración de textiles, con el estiramiento de las fibras hiladas en agua hirviendo. Otro ejemplo de la polaridad, se ve reflejado en el alto valor del parámetro de solubilidad  $[15.4(\text{cal/cc})^{1/2}]$ , el cual es una medición de la densidad de energía cohesiva del polímero. Por lo tanto, los solventes polares pueden ser usados para solubilizar el PAN.

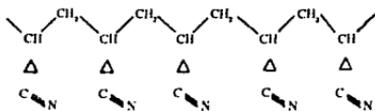


FIG 6.1 Estructura molecular ideal para el PAN

También es importante el fuerte enlace intermolecular ocasionado por la polaridad de los grupos nitrilo, cuando se producen fibras de grafito base PAN o sus copolímeros porque la fibra tenderá a descomponerse antes de fundirse.

A continuación trataremos brevemente los cinco pasos que se llevan a cabo para la elaboración de las fibras de grafito base PAN.

## 1) Hilado del precursor PAN

El PAN y sus copolímeros generalmente son producidos por un proceso de hilado-húmedo, en el cual una sección de polímero y un solvente apropiado son hilados en un baño de condensación, posteriormente las fibras son lavadas, estiradas y secadas; usualmente las fibras obtenidas por éste proceso presentan una sección transversal circular. La estructura molecular y las propiedades de las fibras hiladas están influenciadas por los diversos procesos de hilado. No obstante, el efecto de los procesos de hilado sobre las propiedades de la fibra carbonizada es discutible.

Por medio de micrografías electrónicas obtenidas a partir de fibras hiladas, se muestra que los grupos moleculares de PAN se juntan para formar una red fibrilar tridimensional, viéndose afectada la longitud de las fibrillas del precursor entre la unión de la red por la temperatura de condensación. Las bajas temperaturas del baño dan solidez a las estructuras de la red, así como la composición del baño de condensación y la tasa de extrusión también influyen en la estructura de la red. La conformación de las moléculas del PAN en las fibrillas que componen la red tridimensional son hélices irregulares, dichas hélices se deben a la fijación del mismo PAN.

La elaboración de fibras de grafito base PAN, también puede llevarse a cabo por la técnica de hilado seco, donde la solución del polímero es extruida en una máquina de hilado vertical descendente, con una corriente ascendente de aire caliente, el cual evapora el solvente de las fibras antes de ser colectadas, las fibras resultantes muestran una sección transversal en forma de "hueso de perro".

## 2) Distensión del precursor

Para obtener la orientación de las fibrillas que conforman la red tridimensional, las fibras son estiradas cuando aún se encuentran firmes en el baño de condensación o por estiramiento de las fibras del copolímero en agua hirviendo. Estas operaciones mejoran las propiedades mecánicas de las fibras, aunque este mejoramiento no se debe al aumento de cristalinidad o al ordenamiento molecular, sino a la orientación preferente de las fibrillas, como se observa en la figura 6.2.



FIG 6.2 Efecto del estiramiento en una red fibrilar

Para producir altas resistencias y altos módulos en las fibras de grafito base PAN o en sus copolímeros, es necesario inducir una orientación molecular preferentemente paralela al eje de la fibra y posteriormente estabilizarla contra el fenómeno de relajación y las reacciones de corte en las cadenas que ocurren durante el proceso de carbonización.

### 3) Estabilización a 220°C en aire, bajo tracción

Cuando el PAN es estabilizado en una atmósfera oxidante no sólo se cristaliza, también ocurren reacciones entre el polímero y el oxígeno. Estudios recientes hacen evidente que el oxígeno presente en el polímero oxigenado está en forma de grupos hidroxilos y carbónicos. En resumen, la microscopia infrarroja ha dado evidencia que el carbono de entrelazado doble es producido realmente en la oxidación, así el PAN oxidado tiende a ser más estable térmicamente, que aquel formado en atmósferas inertes. Una estructura de PAN oxidado se muestra en la figura 6.3 donde la tasa de oxidación de las fibras base PAN parece ser controlada por la tasa de difusión del oxígeno al centro de la fibra.

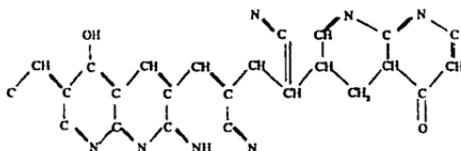


FIG 6.3 Estructura molecular de la oxidación del PAN

Para la estabilización de las fibras de PAN, el método preferido es el de oxidación porque ofrece una mayor estabilidad térmica a las fibras que la técnica de estabilización en gas inerte. Específicamente, las fibras, en general, son primeramente estiradas (para alinear las redes fibrilares) y entonces son oxidadas a temperaturas aproximadamente de 200°C a 220°C variando los lapsos de tiempo. Durante este tratamiento las fibras están sujetas a tracción para mantener el grado de orientación.

#### **4) Carbonización a 1500°C en atmósfera inerte**

La carbonización es el proceso de pirolizado y estabilización de las fibras base PAN, realizado hasta que las fibras son transformadas esencialmente en fibras de grafito.

La carbonización con tratamiento térmico generalmente es realizada en una atmósfera inerte, en un rango de temperaturas de 1000°C a 1500°C. A temperaturas menores de 1000°C, una gran cantidad de productos gaseosos (metano, hidrocianuro, bióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, amoníaco, así como otros hidrocarburos) son desprendidos del precursor de la fibra. Siendo la composición química de la fibra, a 1000°C, de un 94% de carbono y un 6% de nitrógeno. La formación del nitrógeno se inicia casi a 600°C, la tasa máxima se da a los 900°C, a 1300°C el contenido de nitrógeno es del 3%, éste es un elemento importante en las propiedades eléctricas de las fibras.

#### **5) Grafitización a 3000°C en atmósfera inerte**

Es importante decir que el nombre de grafitización es inadecuado, debido a que el proceso no es el resultado de la formación del verdadero cristal de grafito en la estructura de la fibra. La estructura cristalina de una fibra de grafito es aquella de un grafito turboestrúctico, en la cual las capas planas o átomos de carbono son ligeramente desplazados de su posición ideal. Generalmente este proceso de grafitización es llevado a temperaturas mas allá del orden de los 1800°C en una atmósfera inerte, mejorando el módulo de elasticidad de la fibra, la estructura cristalina y la orientación preferente del grafito (cristalítica) dentro de la fibra.

Dentro de los procesos de elaboración de las fibras de grafito base PAN, se observa una pérdida de masa en función de la temperatura de carbonización, ver figura 6.4. Aproximadamente del 55% al 60% de la masa original se pierde como base de una carbonización a 1600°C, indicando recíprocamente un rendimiento del 40% al 45% de un grafito base PAN, resultando esto una razón importante por la que el PAN sea un precursor atractivo para las fibras de grafito. La densidad obtenida de las fibras carbonizadas y grafitizadas generalmente es del rango de 1.7g/cm<sup>3</sup> a 2.1g/cm<sup>3</sup>, mientras que el diámetro final generalmente se encuentra en un promedio de 7 micras a 10 micras.

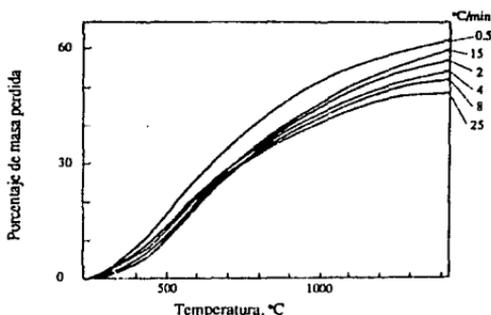


FIG 6.4 Pérdida de masa en función de la temperatura

#### A.1.2) Estructuras de las fibras de grafito base PAN

El desarrollo de la estructura de grafito en hojas de PAN pirolizado, comienza a ocurrir a bajas temperaturas de 400°C a 600°C, por el mecanismo de deshidrogenación de las moléculas adyacentes de PAN resultando en la formación de estructuras semejantes al grafito, consistentes de tres hexágonos en la dirección lateral, unidos con átomos de hidrógeno en la periferia. A temperaturas mayores de 600°C, el nitrógeno de los anillos heterocíclicos es inestable, llegando a ocurrir reacciones de desnitrógenación. El efecto de movimiento del nitrógeno de los anillos heterocíclicos es de modo que este crecimiento molecular lateral de las hojas de grafito llegue a ser posible, especialmente en espacios reducidos.

El crecimiento del grafito en forma de hojas, resulta en la formación de grandes capas onduladas de grafito turboestrático orientado en la dirección general de los ejes de la fibra. El mecanismo para la formación de las cintas de fibras de grafito base PAN descrita, se encuentra representada esquemáticamente en la figura 6.5.

De acuerdo a estudios hechos por Rulan, Johnson y Tyson, a la microestructura y textura de las fibras carbonizadas, por medio de la difracción de rayos X y microscopía electrónica, se concluye que las cintas encontradas en las fibras se parecen a las mostradas en la figura 6.6.

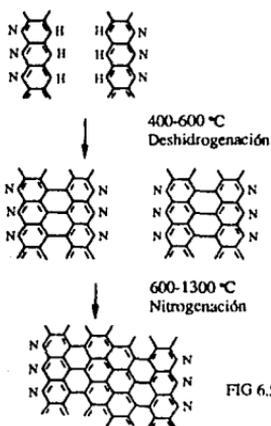


FIG 6.6 Estructura de la fibra de carbono propuesta por Ruland

FIG 6.5 Mecanismo de formación de cintas de grafito base PAN

Como se puede ver en el modelo, una gran cantidad de microporosidades pueden existir en las fibras dependiendo de la frecuencia y amplitud de las ondulaciones. Debido a que las fibras son tratadas térmicamente a altas temperaturas, la longitud de onda de la ondulación aumenta, la amplitud disminuye y la microporosidad tiende a cerrarse, también se observa que la estructura de la cinta puede caracterizarse por los parámetros  $L_c$  y  $L_a$ ,

los cuales pueden ser obtenidos de los datos de los rayos X ( $L_c$  representa la altura del apilamiento de la cinta, mientras que  $L_a$  es la medición media de los planos basales "rectos" en la cinta). Ambos  $L_c$  y  $L_a$  aumentan conforme se incrementa la temperatura del tratamiento térmico. Además el grado de orientación preferida de las cintas paralelas a los ejes de las fibras y por consecuencia los módulos de elasticidad aumentan conforme aumenta la temperatura del tratamiento térmico.

La variación en la orientación de la fibra se ilustra en la figura 6.7, dicha variación es preferente desde la superficie hasta el corazón de la fibra y no sólo puede ser para las fibras de grafito base PAN con una sección circular (hilado en mojado)(fig. 6.8), sino también en las fibras de grafito de sección transversal en forma de "hueso de perro" (precursor hilado en seco, fig. 6.9).

Ahora bien cabe mencionar que las fibras de grafito se encuentran disponibles en diversas formas como son: continuas, cortas, textura tejida o petatillo, estopas, hebras, mechas y cintas, estas fibras se pueden adquirir con o sin agente adhesivo.

El tipo y forma de la fibra de grafito empleada en la elaboración de un compuesto, dependerá de la aplicación particular (por ejemplo: aeroespacial, automotriz, médica o industrial) y al método de fabricación (por ejemplo: cinta lay-up, moldeado por inyección o extrusión).

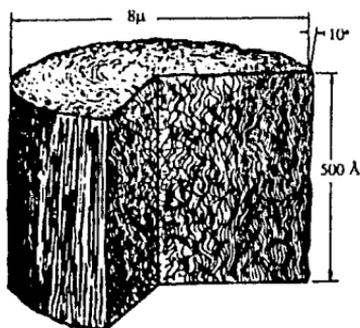


FIG 6.7 Estructura tridimensional de la fibra de grafito con una resistencia a la tensión de 280 GPa

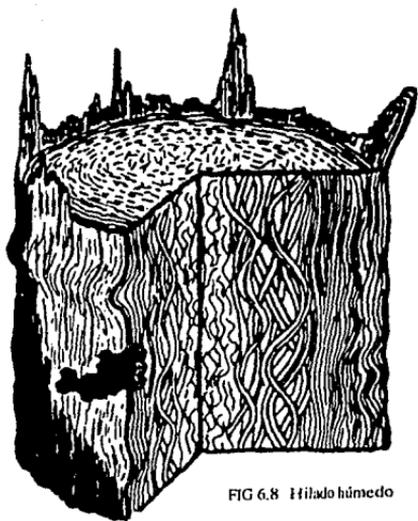
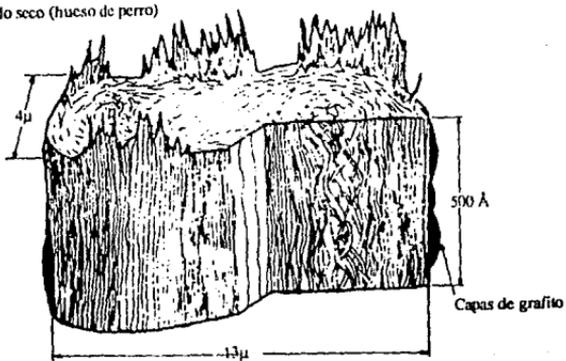


FIG 6.8 Hilado húmedo

FIG 6.9 Hilado seco (hueso de perro)



### A.1.3) Propiedades mecánicas de las fibras de grafito base PAN

Los módulos de elasticidad están íntimamente relacionados con las temperaturas del tratamiento térmico que han experimentado las fibras. Es comprensible que estén determinados por la estructura y el grado de orientación de las cintas de carbón incluidas en cada fibra y en función de la temperatura de pirolizado. En la figura 6.10 se muestra el módulo de elasticidad de las fibras de grafito base PAN en función de la temperatura del tratamiento térmico.

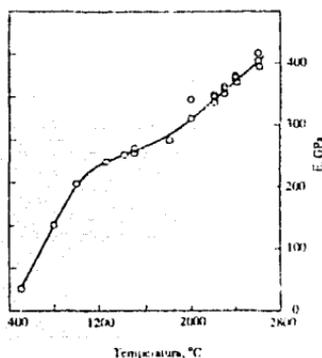


FIG 6.10 Módulo de elasticidad del grafito contra temperatura

Como se ve, el módulo comienza a desarrollarse a bajas temperaturas y continúa aumentando conforme aumenta la temperatura de pirolizado, por ejemplo, las fibras con un módulo de 210GPa se obtienen con una temperatura de pirolizado de 1000°C a 1100°C, para obtener un módulo de 345GPa se tendrá que aumentar la temperatura a 2000°C. Sin embargo, también otros factores influyen en el desarrollo de los módulos de elasticidad, como puede ser el mantener en forma paralela las fibrillas del PAN durante el paso de estabilización, necesitando primeramente el estiramiento (para adquirir la orientación) y mantener la fibra bajo tracción durante la estabilización (para evitar la relajación).

Los factores que influyen en la resistencia a la tracción de las fibras de grafito base PAN son muchos y más difíciles de entender, que aquellos que determinan los módulos de elasticidad. La figura 6.11 nos muestra la curva típica de la resistencia a la tracción contra la temperatura del tratamiento térmico. Como se ve, la resistencia a la tracción no aumenta conforme se incrementa la temperatura del tratamiento térmico. Más bien, una resistencia máxima a tracción de casi 3100MPa es observada para fibras elaboradas aproximadamente de 1200°C a 1400°C, mientras que para fibras procesadas a altas temperaturas la resistencia disminuye drásticamente.

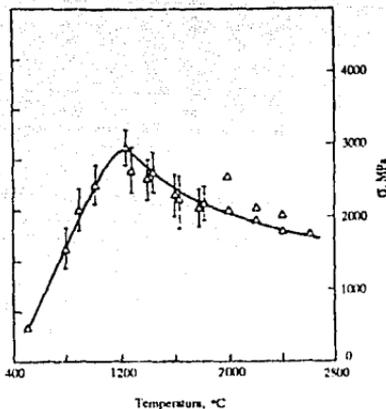


FIG 6.11 Resistencia a la tensión contra temperatura de tratamiento térmico

Probablemente la resistencia a la tracción de las fibras es controlada por la presencia de pequeñas grietas, dentro del volumen y en la superficie de éstas. Los defectos originados en el volumen se clasifican en cuatro tipos: inclusiones inorgánicas, inclusiones orgánicas, vacíos irregulares debidos a la rápida condensación y vacíos cilíndricos precipitados por los gases disueltos.

Durante el tratamiento térmico, estos defectos son transformados en diversas imperfecciones mantenidas en la fibra final. Seguramente uno de los

defectos de volumen más importantes son las grietas, ya que se dan como resultado de las contracciones térmicas anisotrópicas que se presentan en el interior de la estructura al enfriarse después del tratamiento térmico. Aunque las grietas están alineadas al eje de las fibras, solo afectan la resistencia a la tracción. Los defectos superficiales también limitan la resistencia a la tracción; para reducirlos en una forma eficaz se lleva a cabo el proceso de oxidación, el cual incrementa los niveles de resistencia a la tracción.

Finalmente por medio de los estudios hechos por Tokarsky y Diefendorf, se mostró que la resistencia a la tracción de las fibras no sólo está en función de los defectos superficiales y de volumen, sino también se encuentra afectada por la textura radial y axial de las fibras. La disminución en la resistencia a la tracción está dada por el desarrollo de una orientación radial preferente la cual causa microgrietas al ocurrir una disminución de la temperatura de procesamiento. Para las fibras de grafito base PAN con una sección transversal en forma de "hueso de perro" (hilado en seco), se observa un aumento en los niveles de resistencia a la tracción al ser tratada térmicamente a una temperatura superior a los 2800°C.

La deformación típica a falla para un módulo bajo (210GPa) y una alta resistencia (3275MPa) en una fibra de sección transversal circular es aproximadamente de 1.5% a 1.6%, mientras que para una fibra de alto módulo (450GPa) con una respectiva baja resistencia (1620MPa), es aproximadamente 0.36%. Para las fibras de grafito base PAN, en forma de "hueso de perro", se observa un comportamiento diferente; para una fibra con un módulo de elasticidad de 210GPa y una resistencia a la tracción de 2410MPa, la deformación para fallar es del 0.92%; y para una fibra con un módulo de elasticidad de 6.9 GPa y una resistencia a la tracción de 2895MPa, la deformación para fallar es del 0.72%.

## A.2) Resina Epóxica

En el año de 1909 el químico ruso Prileschajev, observó por primera vez la formación de una molécula epóxica. Sin embargo, no sería sino hasta 1947 cuando se inició la aplicación comercial de este tipo de resinas. Por definición, cualquier molécula que contenga el grupo de la fig 6.12 es llamado un epoxi, siendo identificado por la presencia de dos o más anillos por molécula.

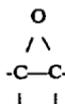
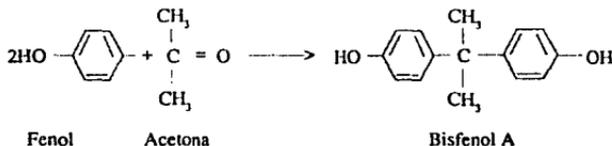


Figura 6.12. Diagrama del grupo epoxi

Las resinas más comunes son hechas a partir de bisfenol "A" (derivado del fenol y la acetona "A").

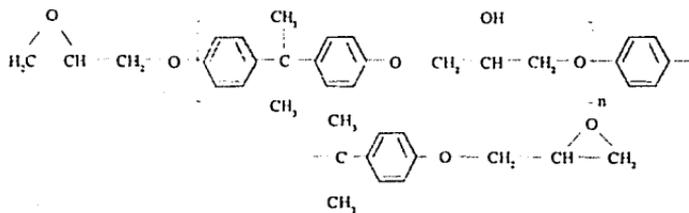




- La amplia variedad disponible de resinas epóxicas y agentes de curado, pueden formularse para proporcionar un amplio rango de propiedades después del curado y para reunir una gran variedad de los requisitos de elaboración.
- Durante la reacción química entre las resinas epóxicas y un agente de curado, no se liberan volátiles y agua. Y por consiguiente, la contracción después del curado es normalmente más baja que la que se presenta en las resinas fenólicas y poliéster.
- El curado de las resinas epóxicas las hace resistentes a los químicos y proporciona buen aislamiento eléctrico.

Si se toma en cuenta la estructura química del epoxi, la estructura del agente de curado, será posible obtener propiedades en diversos grados, dichas propiedades pueden ser: dureza, resistencia al calor, flexibilidad, resistencia adhesiva y propiedades mecánicas.

La mayor parte de las resinas epóxicas comerciales que se distribuyen parcialmente polimerizadas son en forma de líquidos viscosos o sólidos y están conformadas de una combinación de bisfenol "A" y epíclorhidrina, la cual conduce a la formación lineal de cadena corta:



La forma líquida corresponde a un valor de "n" que se encuentra en el rango de  $0 \leq n \leq 0.3$ , y son apropiadas para moldeo por curado. Este tipo de resinas con varias unidades repetitivas son sólidas a temperatura ambiente y pueden ser fundidas o disueltas. Siendo adecuadas para polvos de moldeo, recubrimientos y preparados a los que se les añade disolvente para su aplicación. Al ser curadas presentan propiedades mecánicas superiores a las de los sistemas líquidos y muestran también un encogimiento menor.

Si "n" varía de:	La presentación de la resina será:
0-1	líquida
1-2	semisólida
2-100	sólida

#### A.2.1) Resinas de alta temperatura

Dentro de las resinas epóxicas encontramos que existen las que se pueden utilizar en sistemas de altas temperaturas. Estas se encuentran caracterizadas por la presencia de un gran número de anillos en la estructura. A continuación hablaremos de algunos de estos sistemas.

##### a) Epoxies Novolac

Estas resinas comúnmente son formadas por la reacción del fenol o por la sustitución del fenol con formaldehído, el cual es reaccionado posteriormente con epíclorohidrina para formar la resina epóxica, diglicidil éter de bisfenol "A".

Estas resinas encuentran aplicación donde se requieren bajas cantidades de especies iónicas, alógeno total e impurezas alcali metálicas.

##### b) Resinas epoxi cicloalifáticas

Son producidas de cicloalifáticos tales como ciclopentadieno vía oxidación del ácido peracético o de diversas clases de compuestos poliolefinicos tales como aceites

insaturados vegetales y animales, poliéteres, poliésteres y derivados de butadieno, presentando un alto grado de estructura anular y se pueden usar para altas temperaturas, dando productos resistentes al medio ambiente. Estas resinas son saturadas y tienen el anillo epóxico en la estructura cíclica.

Los epoxies cicloalifáticos, casi siempre son curados con anhídridos para formar sistemas térmicamente estables, reportando resistencias aun a temperaturas que van de 316°C a 371°C. Se aplican en laminados para temperaturas elevadas, aislamiento eléctrico y recubrimientos, también presenta buenas características de resistencia al medio ambiente debido a los anillos saturados.

#### A.2.2) Resinas Flexibles

Para epoxies con formulaciones semiflexibles, la forma básica esta compuesta de cadenas rectas sin estructuras anulares, por ejemplo:

Las resinas epoxies de tipo flexible pueden mezclarse con epoxies convencionales para mejorar la resistencia al impacto, siendo mas reactiva que las del tipo bisfenol "A". Entre los materiales que imparten flexibilidad están las resinas de butadieno, los polisulfuros, los agentes de curado de poliamida y los plastificantes.

#### A.2.3) Epoxies con retardo a la flama

Las resinas epoxies conteniendo del 15% al 50% de bromuro, exhibe buenas características de retardo a la flama. Usualmente están producidos por la reacción de tetrabisfenol de acetona (TBBA) con diglicidil éter de bisfenol "A" (DGEBA). Con frecuencia se mezcla con epoxies convencionales para obtener de 3% al 15% de halógeno en la mezcla resina/agente de curado. Generalmente, se usan compuestos de antimonio, fósforo y boro en combinación con las resinas bromadas para reducir la inflamabilidad.

#### A.2.4) Mecanismos y agentes de curado

El grupo epoxi puede ser enlazado químicamente con otras moléculas para formar una gran red tridimensional. Al hecho de transformar una resina líquida en sólida se le denomina curado, la resina puede reaccionar con un agente de anillo cruzado, un endurecedor o un catalizador para dar una resina termoestable y desarrollar propiedades físicas deseables.

Esta reacción se realiza por medio de un mecanismo de apertura de anillos, para esto será necesario que existan un catalizador y un donador de hidrógeno tal como el  $H_2O$  o un grupo oxhidrilo. Las amidas primarias y secundarias actúan como catalizadores y donadores de hidrógeno. A continuación se muestra este tipo de reacción

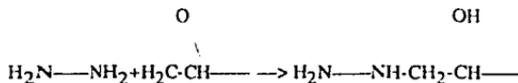
El grupo oxhidrilo se vuelve a formar en la reacción, con lo cual se permite la continuación del proceso.

##### A.2.4.1) Agentes de curado

El número de agentes de curado para las resinas epoxi es grande, por lo que a continuación describiremos los más comunes.

###### a) Aminas primarias, secundarias y terciarias

Muchas de las estructuras de las aminas incluyen grupos reactivos en cada extremo, lo cual permite la formación de un enlace cruzado entre moléculas epoxi. Por ejemplo, un grupo final amina con dos hidrógenos sobre el nitrógeno (una amina primaria) reacciona con una molécula epoxi como se muestra:



Los agentes de curado que contienen grupos aminas secundarias (un hidrógeno sobre el oxígeno) reaccionan de la misma manera. Para que exista un enlace cruzado completo, los hidrógenos de las aminas primarias y secundarias deben relacionarse en correspondencia de 1:1 con los grupos epoxi. Para obtener la cantidad estequiométrica de cantidades de agente de curado en resina epóxica se emplea la siguiente ecuación:

$$\frac{\left[ \begin{array}{l} \text{Peso Molecular de Amina} \\ \text{Número de Hidrógenos} \\ \text{disponible por molécula} \end{array} \right]}{\text{Peso Equivalente del Epóxico}} \times 100 = \begin{array}{l} \text{Partes por peso de} \\ \text{aminas que deben ser} \\ \text{usadas con 100 partes} \\ \text{de resina epóxica} \end{array}$$

#### b) Aminas Terciarias

Las aminas terciarias (ningún hidrógeno sobre el nitrógeno) son bases Lewis, las cuales curan las resinas epóxicas en una forma diferente a las aminas aromáticas y aminas alifáticas. Estas bases se encuentran formadas por trifluoruro de boro, el cual, al ser añadido en pequeñas cantidades sobre la resina, funciona como un catalizador por homopolimerización catiónica de las moléculas epóxicas en un poliéster, causando una rápida polimerización. También es un agente de curado latente a temperatura ambiente, volviéndose activo a casi 90°C, causando un curado rápido.

#### c) Anhídridos

Los agentes de curado llamados anhídridos usualmente requieren de un almacenamiento cuidadoso para prevenir la degradación por absorción de agua, también requieren regularmente de la aplicación de calor para iniciar el curado y llevarlo a cabo completamente. Los anhídridos reaccionan con las resinas epóxicas para formar esteres y para que ocurra la reacción de curado debe abrirse el anillo anhídrido con pequeñas cantidades de compuesto que contengan protones, por ejemplo: ácidos, alcoholes, fenoles y agua.

#### A.2.5) Sistemas de resinas epóxicas curadas

A continuación daremos una serie de generalizaciones que están hechas en base a las relaciones entre la estructura química y las propiedades de una resina epóxica curada.

- 1.- El gran número de anillos aromáticos que contiene una resina epóxica curada provocan una mayor estabilidad térmica y resistencia química.
- 2.- Las resinas epóxicas curadas con agentes aromáticos son preferidas por ser más rígidas, ofreciendo un producto curado más resistente que aquellos con agentes de curado alifáticos. Sin embargo estos sistemas requieren altas temperaturas de curado porque reducen rápidamente la rigidez, reduciendo la movilidad molecular necesaria para proveer la posición final en los grupos de reacción.
- 3.- Una baja densidad de entrelazado puede aumentar el endurecimiento (si la resistencia no es disminuida significativamente), permitiendo una gran elongación antes de fracturarse.
- 4.- Una baja densidad de entrelazado también resulta en un menor rompimiento durante el curado.
- 5.- Una alta densidad de entrelazado produce un incremento en la resistencia al ataque químico.
- 6.- Una alta densidad de entrelazado también induce a un incremento en la temperatura de distorsión (temperatura de transición vítrea), también la densidad baja la relación falla-deformación (aumenta la fragilidad).
- 7.- El reemplazamiento de la sección molecular aromática por secciones alifáticas o cicloalifáticas da una mayor flexibilidad y extensibilidad a la resina curada.
- 8.- Una composición de sistemas curadas con anhídridos son mejores en un ácido medio que en una base media.

#### A.2.6) Diluyentes reactivos y aditivos

Existen diversos tipos de reactivos diluyentes que permiten reducir la viscosidad de las resinas epóxicas, en general su adición reduce las propiedades térmicas y mecánicas. Si el porcentaje del diluyente es bajo ( $\leq 10\%$ ), la reacción de la viscosidad puede ser mayor que la disminución de las propiedades.

Entre los diluyentes reactivos típicos se incluye el éter butil-glicídico. Los compuestos epoxi de bajo peso molecular presentan una presión de vapor alta y problemas de toxicidad, en general se prefiere el éter decil-glicídico y el cresil-glicídico debido a sus bajas presiones de vapor. El éter decil-glicídico reduce la fragilidad al mínimo, mientras que el éter cresil-glicídico afecta mínimamente las propiedades de resistencia a la temperatura. También se usan diluyentes dirreactivos, tal como el éter 1,4-butanodiol-diglicídico y el dióxido de vinilciclohexano. Estos diluyentes difuncionales suelen tener un efecto mínimo sobre las propiedades de la resina.

Frecuentemente a las resinas epoxies se les añaden cargas y/o modificadores líquidos no reactivos, dichas cargas son la sílice, los talcos, el carbonato de calcio y los polvos de aluminio. Estos materiales son incorporados para reducir el encogimiento y la exoterma y para modificar las propiedades del proceso o de curado. Los modificadores no reactivos son usados principalmente para reducir la viscosidad, obtener costos más bajos y/o para impartir un cierto grado de flexibilidad. Entre los modificadores se encuentran incluidos los plastificantes como el ftalato de dibutilo, los residuos de petróleo y alquitrán. Generalmente su uso representa un sacrificio de propiedades físicas, eléctricas o térmicas en sus formulaciones.

#### A.2.7) Aplicaciones

La gran utilidad y versatilidad de este tipo de resinas se observa en la diversidad de aplicaciones; algunas de estas son:

- **Recubrimientos protectores.** Aquí se aprovechan principalmente la resistencia química, la adhesión y la dureza. Se usan como "primer" en autos y aparatos, revestimientos de latas, pinturas de mantenimiento industrial y materiales de acabado de lanchas y barcos.

- **Recubrimientos de mantenimiento.** Formados con sistemas de dos componentes que secan con aire y sin solvente, los cuales producen capas durables, no porosas y duras. Se observa una reducción en los costos de aplicación y muestran buena resistencia al agua, ácidos, álcalis, solventes y a la corrosión.
- **Electricidad y electrónica.** Para este campo de aplicación se aprovechan las propiedades eléctricas, la elevada resistividad volumétrica y el reducido factor de disipación, así como la alta resistencia mecánica, tanto en condiciones de mojado como de humedad abundante. Se encuentran aplicadas en encapsulados, en la fabricación por colado de interruptores, aislantes, conectores y en equipos de proceso químico.
- **Adhesivos, laminados y plásticos reforzados.** Las ventajas para emplearlos como adhesivos se derivan de la reacción completa durante el curado, no desprender sustancias volátiles y la contracción mínima que presentan.

Los plásticos reforzados con resinas epoxi ofrecen ventajas muy grandes, por lo que son empleados en carcazas de motores de cohetes, tanques y recipientes a presión.

- **Industria de la construcción.** Por su gran resistencia al ataque de productos químicos y solventes, por su adhesividad al concreto y su alta estabilidad dimensional se han utilizado en el recubrimiento de pisos industriales, como materiales de pavimentación para carreteras y adhesivos para la construcción de puentes segmentados.

### A.3) Justificaciones de los constituyentes

#### - Grafito -

El grafito, comparándolo con otros materiales, presenta las mejores propiedades en cuanto a módulo, resistencia a la tracción y bajo peso específico (Tabla 6.1).

Material	Resistencia a la tracción [GPa]	Módulo elástico [GPa]	Gravedad específica
<b>Fibras no metálicas</b>			
Asbesto	5.86	186	2.5
Vidrio "E"	3.65	75.8	2.53
Sílice fundida	4.62	68.9	2.50
Boro o tungsteno	6.89	379	2.3
Grafito	3.10	483	1.9
Nilón 66	1.03	4.83	1.1
<b>Cables metálicos</b>			
Acero al carbono (0.1mm diam.)			
0.9 por 100	4.14	207	7.8
Acero inox. 18.8	2.07	200	7.9
Tungsteno	3.79	345	19.3
Titanio	2.21	103	4.5

Tabla 6.1 Comparación de módulos y resistencia en diferentes materiales

Otras de las características que presenta para el uso estructural deseado son: dureza, resistencia a la fatiga, resistencia a la termofluencia, baja expansión térmica, resistencia abrasiva y bajo coeficiente de fricción.

#### - Resina Epóxica -

Este tipo de resina fue elegido por ser más económicas de hacer, por poder ser rápidamente modificada y a un costo más bajo que los materiales metálicos. Además, presenta una alta estabilidad dimensional, buenas propiedades mecánicas y baja contracción, lo que permite elaborar partes en serie dentro de tolerancias extremadamente cerradas.

Debido a la baja viscosidad que presentan las resinas epóxicas, ofrecen buenas propiedades de mojado, lo que conduce a una buena adherencia con una extensa variedad de materiales reforzantes. Otra ventaja que nos ofrecen es que el proceso de curado se realiza a temperatura ambiente. En la siguiente tabla se muestran las proporciones de mezclado definidas por el fabricante.

### Rangos de mezclado

Mezcla	A	B	C
	Partes por peso		
Araldite M	100	100	100
Endurecedor HY 956	20	20	—
Endurecedor HR	—	—	40
Relleno DT077 o DT078	—	150-250	—

**Mezcla A.** - Sin reforzar: para la producción de láminas por "hand lay-up". Mezclar la resina y el endurecedor de 20°C a 25°C. Impregnar cada capa de malla de vidrio con la mezcla resultante y aplíquelo para construir las láminas. Antes de la aplicación, es necesario tratar los moldes con un agente separador para asegurar un buen desmoldeo. Para asegurar la adherencia de las láminas, asegurarse de utilizar una capa gel o agente acoplador y comience la aplicación de la resina mientras aun esta líquida. Como regla general, el espesor final de la lámina deberá estar entre los 5 y 8 mm.

**Mezcla B.** - Reforzada: usado como mezcla para moldes o en compuestos reforzados. Se pueden realizar mezclas incorporando 150-250 partes por peso a la resina. Compuestos reforzados que van a ser presionados se les puede incorporar 1000-1200 partes por peso de relleno a la resina. El refuerzo en polvo debe estar seco y debe ser precalentado a 50°C antes de ser añadidos a la resina. Esto facilita su dispersión homogénea en la resina y en una mezcla sin burbujas. El endurecedor debe ser añadido a la resina reforzada solamente cuando esta ha enfriado a temperatura ambiente.

**Mezcla C.** - Sin reforzar: ofrece transparencia al material. Para lograr un material sin burbujas y una resistencia al impacto, la mezcla debe ser sometida a presión vacuométrica antes de usarse.

## B. Procesos de manufactura de las probetas

Ya que el objetivo de este trabajo es fabricar y obtener las propiedades mecánicas y analizar las posibilidades de uso de un material compuesto, formado por resina epóxica "Araldite M" (Ciba Geigy) y fibra de grafito tipo AS4 (Hércules). Se investigó bajo que normas se podrían analizar estas propiedades del compuesto.

Para realizar posteriormente el análisis en base a la regla de las mezclas, se presento la necesidad de investigar las normas correspondientes para obtener las propiedades a tracción de los materiales en forma independiente.

Como resultado se encontro que para los materiales compuestos se recomienda la norma ASTM D-3039, cuyas dimensiones de la probeta se muestran en la figura 6.13; para los materiales plásticos la norma ASTM D-638, cuyas dimensiones de la probeta se muestran en la figura 6.14; mientras que para los mechones de fibras es la norma ASTM D-2256.

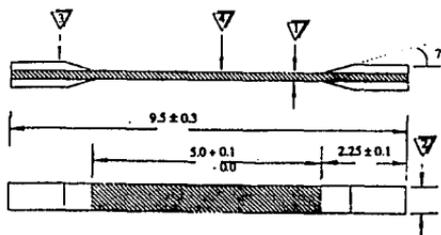
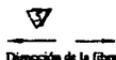
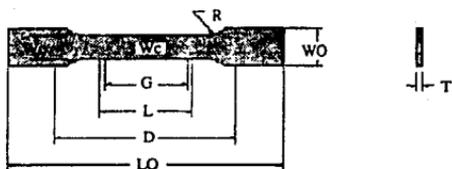


FIG 6.13 Probeta para materiales compuestos a tracción  
(en pulg.)



1. Espesor = 0.04 pulg., longitud de calibración de 5.0 pulg.
2. Ancho =  $0.5 \pm 0.05$  pulg.
3. Cuellos de fibra de vidrio en malla (0°/90°), de espesor de 0.07 pulg., unidas con adhesivo.
4. El espesor de la probeta no debe variar más de 3 milésimas sobre la longitud de calibración.
5. Mantener las fibras alineadas dentro de los  $0.25^\circ$  (0.05 pulg. sobre 12 pulg de largo).



Dimensiones	Tipo 1	Tolerancias
Wc - ancho de la sección angosta	12.7	$\pm 0.5$
L - longitud de la sección angosta	57.1	$\pm 0.5$
WO - ancho total	19.0	$\pm 0.5$
LO - longitud total	165.1	no max.
G - longitud de calibración	50.8	$\pm 0.25$
D - distancia entre mordazas	114.3	$\pm 5$
R - radio de filete	76.2	$\pm 1$
T - espesor	3.2	$\pm 0.4$

FIG 6.14 Probeta para plásticos a tracción (en mm)

Para la elaboración de las probetas de los ensayos de tracción, se fabricaron moldes para las probetas de resina (fig 6.15), para el cuerpo de las probetas (fig. 6.16) y otro para las cuñas (fig. 6.17) .

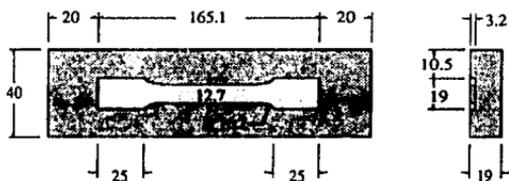
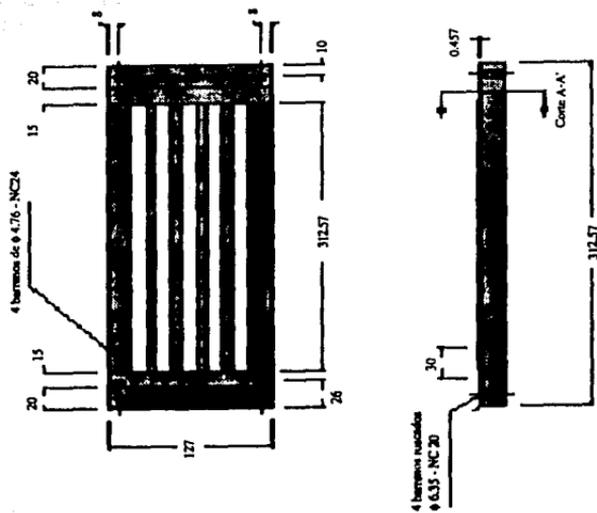


FIG 6.15 Molde para probetas de plásticos

FIG 6.16 Molde para probetas de tracción para compuestos

Acotación en mm



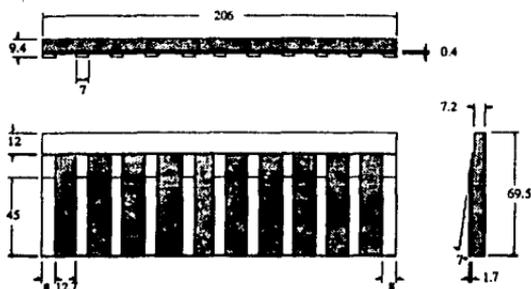


FIG 6.17 Molde para las cuñas del material compuesto (en mm)

B.1) Elaboración del material compuesto.

Los pasos que se siguieron para la obtención de las probetas fue el que a continuación se detalla.

B.1.1) Elaboración del cuerpo de la probeta.

- 1) Aplicación de 3 capas de desmoldante (QZ11) con brocha y pulido con algodón entre capa y capa.
- 2) Ya cortadas los 20 mechones a la longitud requerida, se coloca el primero en cada canal, sujetandolos en un extremo.
- 3) Preparación de la resina en una proporción 100:20.
- 4) Vertir un poco de la resina sobre el molde, procurando homogeneizarla.
- 5) Eliminación de burbujas que se lleguen a generar durante el vaciado.
- 6) Preimpregnación del mechón antes de ser colocado en el molde.

- 7) Colocación sucesiva de los mechones restantes, aplicando a cada uno el paso anterior.
- 8) Aplicación de una capa de resina sobre los mechones hasta cubrir el volumen restante. Y tratar de eliminar burbujas.
- 9) Fijación completa de los mechones (ambos extremos).

La finalidad de utilización de las cuñas, es la de evitar que el cuerpo de la probeta resbale o se fracture cuando se esta llevando a cabo la prueba.

- 10) Colocación de una tira de acetato con un ancho un poco mayor al ancho de la probeta, empezando por un extremo el cual al irse bajando paulatinamente elimina el exceso de resina.
- 11) Ya para terminar se elimina el exceso total de resina y se coloca una placa sobre el molde, con esto se busca tener un control dimensional.
- 12) Después de 24 horas se desmoldean y se eliminan los excesos.
- 13) El curado total se lleva a cabo en 7 días a temperatura ambiente.

#### B.1.2) Elaboración de las cuñas.

La secuencia llevada a cabo para la elaboración de las cuñas se menciona brevemente a continuación.

- 1) Aplicación de desmoldante (3 capas).
- 2) Preparación de las tiras de malla.
- 3) Preparación del molde (colocación de topes).

- 4) Vertir resina.
- 5) Colocación de las mallas en los canales.
- 6) Colocación de los acetatos, uno se coloca en la parte que presenta una pequeña inclinación, y el otro sobre la superficie plana.
- 7) Eliminación del exceso de resina.
- 8) Se botan a las 24 horas y se eliminan los excesos, se dejan 7 días para completar el ciclo de curado.
- 9) Ya completamente curadas, se pegan al cuerpo de la probeta por medio de una delgada capa de adhesivo.

#### B.2) Elaboración de la probeta de resina.

Los pasos seguidos para la elaboración de estas probetas se mencionan a continuación.

- 1) Preparación del molde con desmoldante.
- 2) Vaciado de la resina en el molde.
- 3) Eliminación de burbujas.
- 4) Colocación del acetato.
- 5) Eliminación del exceso de resina.
- 6) Desmoldeo de la pieza 24 horas después.
- 7) Eliminación de excesos y en 7 días se lleva a cabo el curado total.

## C. Ensayos

Para los ensayos realizados, se utilizó una máquina Instron 4206 de tornillo de potencia con una celda de carga de 5 KN (fig. 6.18). Con el empleo de dos tipos de mordazas: a) Mordazas con acción de cuña utilizadas en las pruebas de plásticos y compuestos, b) Mordazas para cuerdas e hilos.

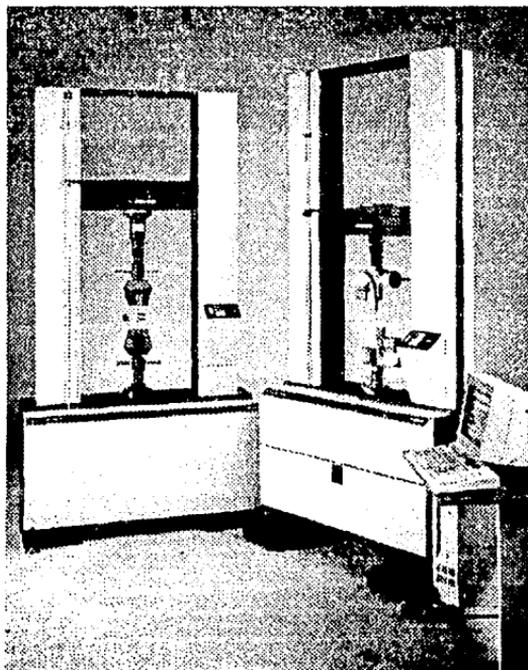
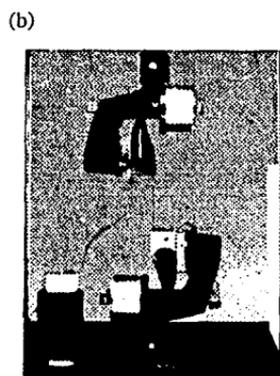
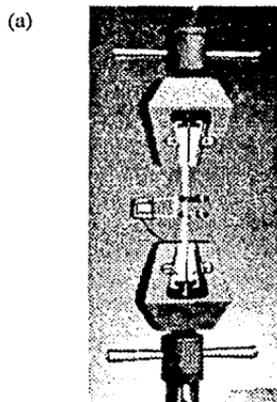


FIG 6.18 Máquina Instron 4206 y accesorios.



Los parámetros según las normas son:

- Para plásticos (norma ASTM D-638)

	Rango	Empleada
Velocidad [mm/min]	5.08+/-25% a 50.8+/-10%	10
Longitud de calibración [mm]	50.8	50.8
Distancia entre Mordazas [mm]	115	115

- Para Fibras (norma ASTM D-2256)

	Rango	Empleada
Velocidad [mm/min]	300+/-10	300
Longitud de calibración [mm]	250	250
Densidad lineal [Tex][g/Km]	738.6	738.5

- Para los Compuestos (norma ASTM D-3039)

	Rango	Empleada
Velocidad [mm/min]	1.27-2.54	2.54
Longitud de calibración [mm]	127	127
Distancia entre mordazas [mm]	160	160

## D. Resultados

Los resultados que a continuación se presentan son los obtenidos directamente de la computadora instalada a la máquina de prueba (Instron Mod: 4206), en base a las normas antes citadas.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

### Ensayo de tensión para plásticos

Tipo de prueba: Tracción

Muestra: ARAOLDITE Tipo de muestra: ASTM D638-90

Parámetros de la máquina:

Tasa de la muestra [µm/sig]: 10.00

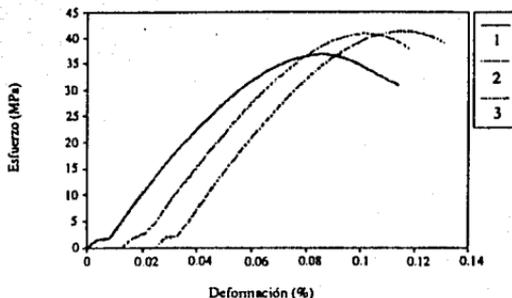
Velocidad de las mordazas (mm/min): 10.00

Dimensiones:

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Ancho (mm)	12.97	12.97	12.96
Espesor (mm)	3.43	3.19	3.19
Long. de cal. (mm)	50	50	50
Dist. mordazas (mm)	115	115	115

Ensayo Número	% Deformación		Esfuerzo		Esfuerzo a 0.2% de cedencia [MPa]	Módulo Young [MPa]	Energía en el Punto de Rup. [J]
	Max [%]	Max [MPa]	Ruptura [%]	Ruptura [MPa]			
1	8.244	36.83	11.26	30.49	21.79	692.5	6.283
2	8.694	40.78	10.55	36.51	25.98	685.2	6.055
3	8.827	41.2	11.97	34.57	24.57	712.3	7.22
Media:	8.588	39.603	11.260	33.857	24.113	696.667	6.519
Desv. Std:	0.306	2.411	0.71	3.073	2.132	14.022	0.617

### Resina Epóxica (Araldite)



#### Prueba de tensión para fibras de arafite

Tipo de prueba: Hilos/fibras

Muestra: HERCULES

Tipo de muestra: ASTM D2256-88

Tasa de la muestra [pts/seg]: 10.00

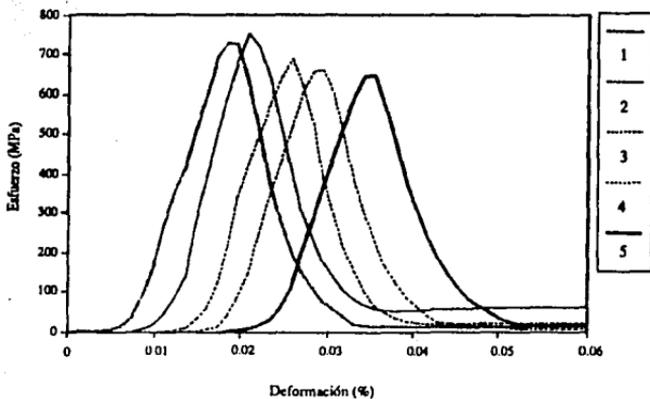
Velocidad de las mordazas [mm/min]: 300.00

Dimensiones:

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
Densidad lineal (tex)	738.6	738.6	738.6	738.6	738.6
Long. calibración (mm)	250	250	250	250	250

Ensayo Número	% Deformación Max [%]	Tenacidad Max [N/tex]	% Deformación a Ruptura [%]	Tenacidad a Ruptura [N/tex]	Módulo [N/tex]	Energía en el Punto de Ceden [J]	Energía en el Punto de Rup [J]	Módulo de Young [MPa]	Esfuerzo Max [MPa]
1	1.09	504300	1.99	88390	43.84690	0.5903	0.969	67590	764
2	1.021	509300	13.02	24730	47.27423	0.4809	1.628	64320	772
3	1.016	454900	1.516	197000	42.42970	0.4689	0.7243	72100	689
4	1.008	452900	1.808	107200	42.57840	0.454	0.8406	71040	686
5	1.115	445300	2.515	33170	37.84884	0.4817	0.9323	73790	675
Media:	1.05	473340	4.1698	90098	42.79561	0.49696	1.01884	69768	717
Desv. Std:	0.049	30804	4.961	69349	3.38433	0.0583	0.3534	3796.61	46.75

### Fibra de Grafito (Hercules)



#### Ensayo de tensión para matriz compoestor

Tipo de prueba: Tracción

Muestra: ARALREF

Tipo de muestra: ASTM D3039-76

Parámetros de la máquina:

Tasa de la muestra [pta/seg]: 10.00

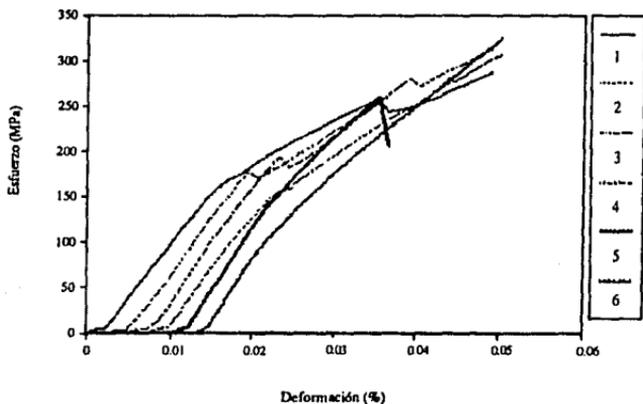
Velocidad de las mordazas [mm/min]: 2.54

Dimensiones:

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5	Ensayo 6
Ancho (mm)	12.73	12.5	12.75	12.72	12.9	12.76
Espesor (mm)	1.28	1.2	1.21	1.27	1.16	1.1
Long. de cal (mm)	127	127	127	127	127	127
Dist. mordazas (mm)	160	160	160	160	160	160

Ensayo Número	% Deformación Max	Esfuerzo Max [MPa]	% Deformación a Ruptura [%]	Esfuerzo a Ruptura [MPa]	Esfuerzo a 0.2% de Cedencia [MPa]	Módulo de Young [MPa]	Energía en el Punto de Rup. [J]
1	4.855	291.2	4.855	291.2	167.7	12680	19.27
2	3.221	263	3.221	263	171	12720	9.693
3	4.253	315.6	4.253	315.6	188.7	14190	16.25
4	4.228	310	4.219	309.4	158.2	11950	15.82
5	2.544	269.6	2.552	269.2	192.7	13950	7.357
6	3.812	329.2	3.812	329.2	175.7	11800	12.39
Media:	3.819	296.433	3.819	296.267	175.667	12882	13.463
Dev. Std:	1.066	26.42	0.823	26.442	13.041	995.779	4.465

### Araldite reforzado con Grafito (14.5%)



### E. Cálculos

Tomando en cuenta la media aritmética de la resina y el grafito procederemos a realizar el cálculo teórico de acuerdo a la regla de las mezclas, tal y como se explica en el capítulo tres (Materiales compuestos reforzados con fibras).

- Cálculo del porcentaje del volumen -

Para el cálculo del volumen de las fibras se toma en cuenta la siguiente fórmula:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} h$$

$$\begin{aligned} \text{Si } D &= 7 \times 10^{-6} \text{ m} \\ h &= 241.3 \times 10^{-3} \text{ m} \\ N &= 12,000 \text{ fibras por mechón} \end{aligned}$$

$$V_G = \left[ \frac{\pi (7 \times 10^{-6})^2 (241.3 \times 10^{-3})}{4} \right] 12,000 = 1.1143 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Como se utilizan 4 mechones

$$V_G = 4(1.1143 \times 10^{-7}) = 4.4574 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

Para el cálculo del volumen del compuesto de acuerdo a las medidas de la probeta:

$$\begin{aligned} \text{Ancho} &= 12.7 \times 10^{-3} \text{ m} \\ \text{Largo} &= 241.3 \times 10^{-3} \text{ m} \\ \text{Espesor} &= 1 \times 10^{-3} \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{por lo tanto } V &= (12.7 \times 10^{-3})(241.3 \times 10^{-3})(1 \times 10^{-3}) \\ V &= 3.0607 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para encontrar el volumen de resina

$$V_R = V_C - V_G = 3.0607 \times 10^{-6} - 0.4457 \times 10^{-6}$$
$$V_R = 2.61496 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por lo que los volúmenes específicos son:

$$\%V_R = \frac{2.61496 \times 10^{-6}}{3.0607 \times 10^{-6}} = 0.8543$$

$$\%V_G = \frac{0.4457 \times 10^{-6}}{3.0607 \times 10^{-6}} = 0.1456$$

- Cálculo del módulo

$$M_C = M_R V_R + M_G V_G$$

R: Resina

G: Grafito

$$M_C = 0.855(696.7) + 0.145(69768)$$

$$M_C = 10712 \quad \text{Módulo teórico [MPa]}$$

$$M_C = 12882 \quad \text{Módulo obtenido experimentalmente [MPa]}$$

- Cálculo del esfuerzo

$$\sigma_C = \sigma_R V_R + \sigma_G V_G$$

$$\sigma_C = 0.855(39.603) + 0.145(717)$$

$$\sigma_C = 137.8 \quad \text{Esfuerzo máximo teórico [MPa]}$$

$$\sigma_C = 296.433 \quad \text{Esfuerzo máximo experimentalmente [MPa]}$$

## **E. Análisis de resultados**

- 1) En las gráficas de tracción se puede observar una discontinuidad, la cual es debida al desprendimiento y/o deslizamiento de las cuñas con la probeta, esto es debido a que no se utilizó un adhesivo adecuado. Sin embargo la falla ocurrió en la parte central de la pieza lo cual es aceptado por la norma.
- 2) De las probetas fabricadas sólo fueron aprobadas aquellas que no presentaron defectos de fabricación visibles tales como: burbujas, un mal curado, o que no cumplieran con las dimensiones de la norma.
- 3) A continuación se muestra el número de ensayos realizados, así como el número de probetas con valores significativos o máximos.

	# Ensayos	# probetas con valores significativos
Resina	5	3
Fibra	7	5
Compuesto	9	6

Las cuales están mostradas en las gráficas correspondientes.

- 4) Las posibles variaciones en los resultados pueden ser debidas a defectos de fabricación tales como: burbujas, defectos superficiales debidos al molde, mal curado y el efecto de la temperatura y humedad del medio ambiente.
- 5) Es recomendable que para la obtención de resultados óptimos, se tenga un adecuado manejo de las probetas. Como por ejemplo al manejar los mechones de fibras, se producen fracturas de algunos filamentos del mechón lo que condujo a pequeñas variaciones en los resultados.
- 6) De los ensayos realizados se pudo deducir una buena adherencia entre la fibra y la matriz (figura 6.19). Lo que conduce a resultados favorables como se observa en la gráfica del compuesto.

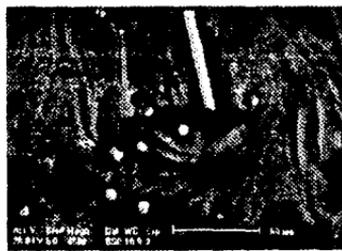
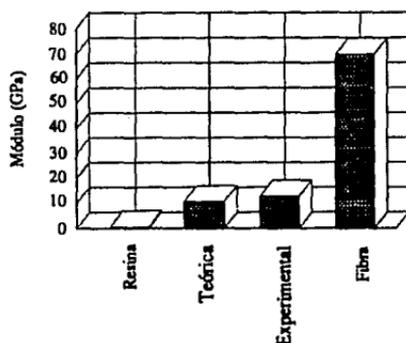
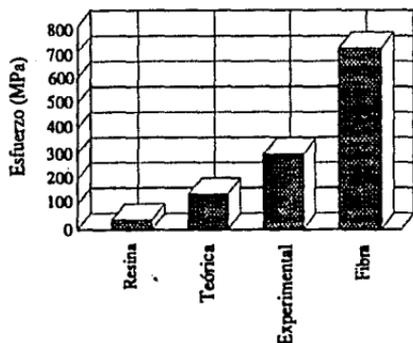


FIG 6.19 Fotografías del microscopio de barrido (cortesía de la Facultad de Ingeniería, UNAM).

- 7) Analizando los datos obtenidos, se observa que la respuesta del material es superior a lo calculado teóricamente utilizando la regla de las mezclas (ver las gráficas de comparación).

### Comparación del compuesto Teórico - Experimental



## Conclusiones

A medida en que el hombre se ha evolucionado tecnológicamente, ha buscado como satisfacer sus necesidades conforme la civilización cambia. Esta búsqueda ha llevado al desarrollo de equipos en el que las exigencias de uso someten a los materiales a condiciones más severas de trabajo.

Actualmente las exigencias requieren de satisfactores elaborados de materiales más durables con un óptimo aprovechamiento de los materiales y ahorro de energía, sin que esto lleve al deterioro del medio ambiente.

Uno de los grandes problemas que muestran los materiales tradicionales es el gran consumo de energía, como por ejemplo en la manufactura de los metales se consume aproximadamente el 11% de la energía total mundial. Una solución a este problema ha sido la elaboración de materiales que nos permiten un ahorro en peso, con propiedades similares o superiores a los tradicionales, con un ahorro de energía en su manufactura, por ejemplo: La energía requerida por kilogramo de material de un material compuesto es cuando mucho la mitad de la empleada por los materiales metálicos.

En base a lo anterior se ha observado la tendencia a sustituir los materiales convencionales por los materiales compuestos en diversas aplicaciones como se observa en la tabla siguiente.

Área de aplicación	Tecnología actual	Siglo 21
- <b>Grandes estructuras</b> Puentes, plataformas petroleras, Buques, Submarinos, Conductos (petr. óleo, gas), cables	Microaleaciones de acero; Q&T Acero/ Cu microaleados Acero patentado de alta pureza	Concreto reforzado con fibras de vidrio y acero CFRPs y acero, Polímeros de alto grado (Termoplásticos), Hbras de fibra de grafito
- <b>Alta temperatura, medio corrosivo</b> Máquinas Ci, Diesel, Rotores de Turbinas de gas, Máquinas herramienta, Plantas Químicas	Hierro fundido, aleaciones Al-Si, Super aleaciones basadas en Ni, Aceros de alta aleación ; WC/TiN, Acero inoxidable austenítico	Nitrato de silicio, Cerámicos de Zirconia PSZ/TZP: cubiertos o en paquetes de Sialon; Cerámicos SiC/SiC Aleaciones de titanio, Cerámico
- <b>Eléctrica, Electrónica, Óptica, Magnética</b> Líneas de alimentación, Chips semi conductores, Sensores (presión, químicos), Chips de alimentación, Celdas de alimentación (sólidos), Fibras ópticas, Imanes permanentes	Cu, Al/Acero reforzado, Silicio, GaAs, As sobre (principalmente Si), As (bidimensional) sobre Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fibras de Silicio de de composición graduada de Nd-Fe-B, Ferritas	Compuestos de Al, superconductores basados en Bi más GaAs; Plietileno saturado grabado con Laser, Polímero tridimensional de GaAs o Polímeros saturados de Si/GaAs; ZrO <sub>2</sub> ; Fibras de fluoruro cromadas, Polímeros de polidiacetileno
- <b>Transporte</b> Cuerpos de automóviles, Fuselajes de aviones, Cuerpos de vagones de trenes, Bicicletas	Acero prensado, Aleaciones de de Aluminio; Al-Li Acero, Aluminio Acero, Aleaciones de Titanio	Aluminio, Termoplásticos, Células de CFRPs; Compuestos celuláres de aleaciones de Magnesio; CFRP
- <b>Deportes</b> Raquetas de tenis, Squash, Cañas de pescar, Tablas de Surfing	Aluminio, CFRPs Bamboo, GFRPs, CFRPs con células de de CFRPs, CFRPs	Carbono/Kevlar/Sic FRPs CFRPs con Cerámicos/Kevlar CFRPs/Celular/ Kevlar/ Fibras tejidas de SiC
- <b>Medicina</b> Cadera, Reemplazo de huesos, implante de dientes	Acero inoxidable, Titanio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Biovidrios de SiO <sub>2</sub>

Aplicaciones futuras de los materiales compuestos

Por todo lo anterior y como resultado de este trabajo, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- \* Como resultado de este trabajo se cumplió con el objetivo en la obtención de un ejemplo notable de estos materiales compuestos, donde pudo verificarse una alta resistencia mecánica muy superior a la de los materiales constituyentes y un significativo bajo peso, lo que nos da una elevada relación resistencia-peso, superior a la de otras familias de materiales.
  - \* Dada la naturaleza del material que fue utilizado como matriz (propiedad de la gran mayoría de los polímeros), este material compuesto puede emplearse en ambientes altamente corrosivos, propiedad que aunada a la relación resistencia-peso nos da una gama muy amplia de aplicaciones que requieran de estas propiedades.
  - \* Para la elaboración del material, se observaron algunos puntos importantes como son: (a) la preimpregnación de las fibras, la cual evita la formación de burbujas; (b) la resina debe ser de baja viscosidad con un largo periodo de curado, para permitir un buen mojado de las fibras y (c) un método para asegurar que las fibras sean unidireccionales. Con esto, se puede asegurar una buena interfase de unión entre los constituyentes y dados los resultados obtenidos, se puede concluir que el material logra una buena interfase entre constituyentes sin utilizar métodos de fabricación complejos o sustancias químicas costosas.
- Si se tiene un buen control del proceso para su elaboración, es posible obtener un material con propiedades mayores a las obtenidas en forma experimental.
- \* Dada la sencillez del proceso de fabricación y a la no necesidad de materiales o equipo muy elaborado, puede adaptarse a cualquier proceso convencional lo que incrementaría enormemente los resultados de ahorro de material sustituyendolo con materiales de mayor resistencia y bajo peso.
  - \* El problema de absorción de humedad que presenta la resina, puede ser solucionado al aplicarle al material una capa delgada de recubrimiento.

- \* Las propiedades resultantes son por mucho superiores a las predecidas por una de las relaciones más conocidas (*regla de las mezclas*) para evaluar el nivel de resistencia que puede lograrse en un material compuesto, lo que abre mayores campos de estudio para confirmar los resultados obtenidos.
- \* En base a la relación discutida anteriormente se pudieron constatar las predicciones obtenidas, que a mayor porcentaje del volumen de reforzante mayores niveles de resistencia, pero a mayor costo de uno de los constituyentes.
- \* En base a lo anterior se puede decir que el material puede ser empleado para las aplicaciones propuestas: en estructuras de antenas de comunicación, cuerpos de motores eléctricos, carcazas de maquinaria, recipientes a presión y cascos de embarcaciones. Y ser diseñados de acuerdo a las especificaciones requeridas de trabajo, principalmente la alta resistencia mecánica, bajo peso y resistencia al medio ambiente de trabajo.
- \* El obstáculo para la utilización masiva de estos materiales es la dificultad de elaboración de los constituyentes, pero a medida que estos se desarrollen y conozcan mejor, se difundirá más la fabricación y el uso de estos materiales, obteniendo un ahorro considerable de energía y material.

En base a lo antes dicho, se puede decir que el material compuesto elaborado en este trabajo puede ser aplicado en:

- + Carcazas de maquinado aun cuando exista un ambiente corrosivo.
- + Recipientes a presión.
- + Estructuras de antenas de comunicación.
- + Cuerpos de motores eléctricos.
- + Tiene un gran potencial de aplicación en la industria aeronáutica en partes de fuselaje del avión, en las vigas "I", "L" que forman la estructura de la aeronave.
- + La gran aplicación que se espera en la industria automotriz, en la elaboración del chasis y la carrocería.
- + Como se pudo constatar en la olimpiada de Barcelona '92, la utilización de una bicicleta elaborada de grafito, lo cual es un indicativo de gran versatilidad del material compuesto.

## Bibliografía

### A. Libros

+ Bhagwan D. Agarwall, Lawrence J. Broutman

Analysis and Performance of Fiber Composites

John Wiley & Sons

1980

Printed in the United States of America

+ Derek Hull

An Introduction to Composite Materials

Cambridge University Press

1981

First Published

Printed in Great Britain

+ Donald R. Askeland

La Ciencia e Ingeniería de los Materiales

Grupo Editorial Iberoamérica

1987

1ª Edición

Impreso en México

+ E.P. De Garmo, J.T. Black, R.A. Kohser

Materials y Procesos de Fabricación

Edit: Reverté S.A.

2ª Edición

Impreso en Barcelona

1988

+ George Lubin

Handbook of Composites

Van Nostrand Reinhold Company

Manufactured in the United States of America

1982

+ Harry S. Kats, John V. Milewsky

Handbook of Fillers of Reinforcements for Plastics

Van Nostrand Reinhold Company

New York

1978

+ Herman W. Pollack

Materials Science and Metallurgy

Edit: Prentice Hall

4ª Edición

1988

+ James A. Jacobs, Thomas F. Kilduff

Engineering Materials Technology

Ed. Printice-Hall Inc

1985

+ J.R. Vinson and R.L. Sierakowski

The Behavior of Structures Composed of Composite Materials

Martinus Nijhoff Publishers

1989

Printed in Netherland

+ Lawrence E. Doyle, Carl A. Keyser

Procesos y Materiales de Manufactura para Ingenieros

Ed. Printice-Hall

1988

3ª Edición

Impreso en México

+ Lawrence J. Broutman, Richard H. Krock

Modern Composite Materials

Addison-Wesley Publishing Company

1972

Printed in the United States of America

+ Lesley Holiday

Composite Materials

Elsevier Publishing Company

1966

Printed in Netherland

+ Reyes M. Humbertu

Espumas Plásticas Estructurales

Editorial Diana

1978

1ª Edición

Impreso en México

+ Richard A. Flinn, Paul K. Trojan

Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones

Mc Graw Hill

1983

1ª Edición

+ Walter E. Diver

Química y Tecnología de los Plásticos

Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.

1979

(C.E.C.S.A.)

Impreso en México

+ Zbigniew D. Jastrzebski

Naturaleza y Propiedades de los Materiales para la Ingeniería

Edit: Interamericana

1979

2ª Edición

Impreso en México

**B. Revistas**

+ Clifford F. Lewis

The Exciting Promise of Metal-Matrix Composites

Mechanical Engineering

May 1986

+ Construcción y Tecnología

Concretos Reforzado con Fibras

Construcción y Tecnología

Enero 1989

+ D. Tanner, A.K. Dhingra, J.J. Pigliacampi

Aramid Fiber Composites for General Engineering  
Journal of Metals  
March 1986

+ J. Müller

Los Plásticos Reforzados por Fibras y su Importancia para la industria  
Metalúrgica pesada  
Revista Técnica Sulzer  
4/1971

+ Mc Graw-Hill

Modern Plastics Encyclopedia  
Mc Graw-Hill  
1983-84

+ Theodore J. Reimbart, Dr. Linda L. Clements

Introduction to Composites  
ASM News  
June 1987

+ Tsu-Wei Chou, Roy L. Mc Cullough, R. Byron Pipes

Materiales Híbridos  
Investigación y Ciencia  
Dic. 86