

MATERIALES COMPUESTOS

INTRODUCCIÓN

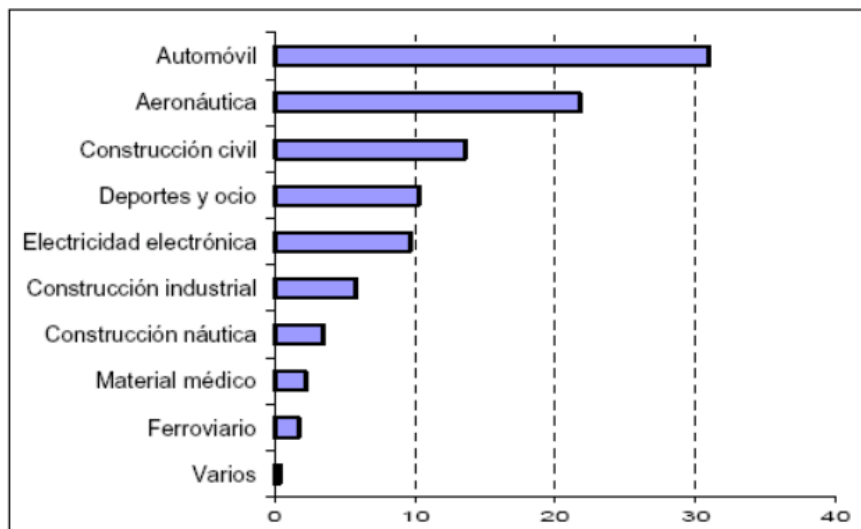
La mayoría de las tecnologías modernas requiere materiales con una combinación inusual de propiedades, imposible de conseguir con los metales, las cerámicas o los polímeros convencionales.

Las combinaciones de propiedades de los materiales y la gama de sus valores se han ampliado y se siguen ampliando mediante el desarrollo de materiales compuestos (composites).

La producción de materiales compuestos se desarrolla rápidamente, con un crecimiento aproximado del 6% anual, en cantidad, especialmente en los países pertenecientes a la Unión Europea, quienes superan el 90% de la producción mundial de materiales compuestos. Estos materiales combinan la materia plástica y el refuerzo con fibras, por lo general de vidrio o de carbono. Aunque su costo es más elevado que el de los materiales tradicionales, aportan a sus usuarios importantes ventajas gracias a sus propiedades, en particular la ligereza y la resistencia. Tales ventajas han abierto a los materiales compuestos importantes mercados en la fabricación de automóviles, la aeronáutica o incluso también en la construcción.

Los primeros materiales compuestos aparecieron durante la Segunda Guerra Mundial. Se trata de materiales heterogéneos, constituidos por una matriz plástica orgánica (polímero) asociada con un refuerzo fibroso, por lo general de vidrio o de carbono. En el Gráfico se pueden observar los sectores usuarios de estos materiales.

Gráfico 1: Sectores en los que se emplean Materiales Compuestos



Fuente: Estudio materiales compuestos - estimaciones Nodal Consultants - año 2000

¿QUÉ ES UN MATERIAL COMPUESTO?

Es un sistema material formado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son insolubles entre sí.

IMPORTANCIA DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

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

Las fases constituyentes están separadas por una intercara (interfase).

Los científicos e ingenieros han combinado ciertos metales, cerámicos y polímeros para producir una nueva generación de materiales extraordinarios. Los materiales compuestos disponen de ventajas con relación a productos competidores, aportando numerosas cualidades funcionales:

ligereza, resistencia mecánica y química, mantenimiento reducido, libertad de formas, rigidez, tenacidad a temperatura ambiente y a altas temperaturas.

Figura 1: Propiedades de los Materiales Compuestos según sector

	Aeronáutica	Automóvil	Ferrovio	Construcción	Construcción Industrial	Industria náutica	Medicina	Electricidad	Deportes & Recreo
Vida útil									
Rigidez				x		x	x	x	x
Resistencia mecánica				x	x	x	x		x
Resistencia a la fatiga	x					x			
Resistencia a la corrosión	x	x		x		x	x		
Impermeabilidad				x	x				
Seguridad									
Resistencia a los choques		x				x			x
Resistencia al fuego	x		x	x	x			x	
Aislamiento térmico				x	x			x	
Aislamiento eléctrico								x	
Amortiguamiento, vibraciones					x				x
Diseño									
Integración de funciones	x	x						x	
Formas complejas	x	x	x	x					x
Transparencia ondas electromagnéticas								x	
Disminución del peso de las estructuras	x	x					x		x

Nota de lectura : En la aeronáutica, los materiales compuestos aportan seis propiedades que permiten distinguirlos de manera positiva de los materiales tradicionales: aumenta la vida útil gracias a su buena resistencia a la fatiga, a la corrosión, aumenta la resistencia al fuego, simplifica el diseño gracias a la posibilidad de la integración de función, de la obtención de formas complejas y su ligereza.

Fuente: Estudio materiales compuestos - estimaciones Nodal Consultants - año 2000

Su uso permite aumentar la vida útil de ciertos equipos gracias a sus propiedades mecánicas (rigidez, resistencia a la fatiga) y también gracias a sus propiedades químicas (resistencia a la corrosión). También refuerzan la seguridad gracias a una mejor resistencia a los impactos y al fuego, ofreciendo un mejor aislamiento térmico o fónico y, para algunos de ellos, eléctrico. También enriquecen las posibilidades de diseño, permitiendo aligerar estructuras y realizar formas complejas, aptas para cumplir varias funciones.

En realidad, la «solución del composite» representa siempre para el diseñador un «salto tecnológico». Los materiales compuestos ofrecen, efectivamente, la posibilidad de realizar un producto específicamente adaptado a las prestaciones solicitadas y optimizar la pareja precio/prestación. Pero, con relación a las soluciones alternativas, el beneficio aportado debe evaluarse desde el diseño, al mismo tiempo que las pruebas que cabe realizar. Por contra, los materiales tradicionales (madera, acero, aluminio) aparecen como una solución de más tranquilidad, puesto que sus prestaciones técnicas son bien conocidas y están bien catalogadas, con lo cual es previsible su comportamiento durante el uso.

Por ejemplo, en el caso de aplicaciones en automóviles, estos materiales compuestos son mucho más ligeros y permiten a los constructores aceptar un sobrecosto de 3 Euros por kg ganado. La disminución de peso total en un vehículo permite un ahorro de carburante de unos 1,5 Euros por 100 km.

FASE MATRIZ Y FASE DISPERSA EN UN MATERIAL COMPUESTO

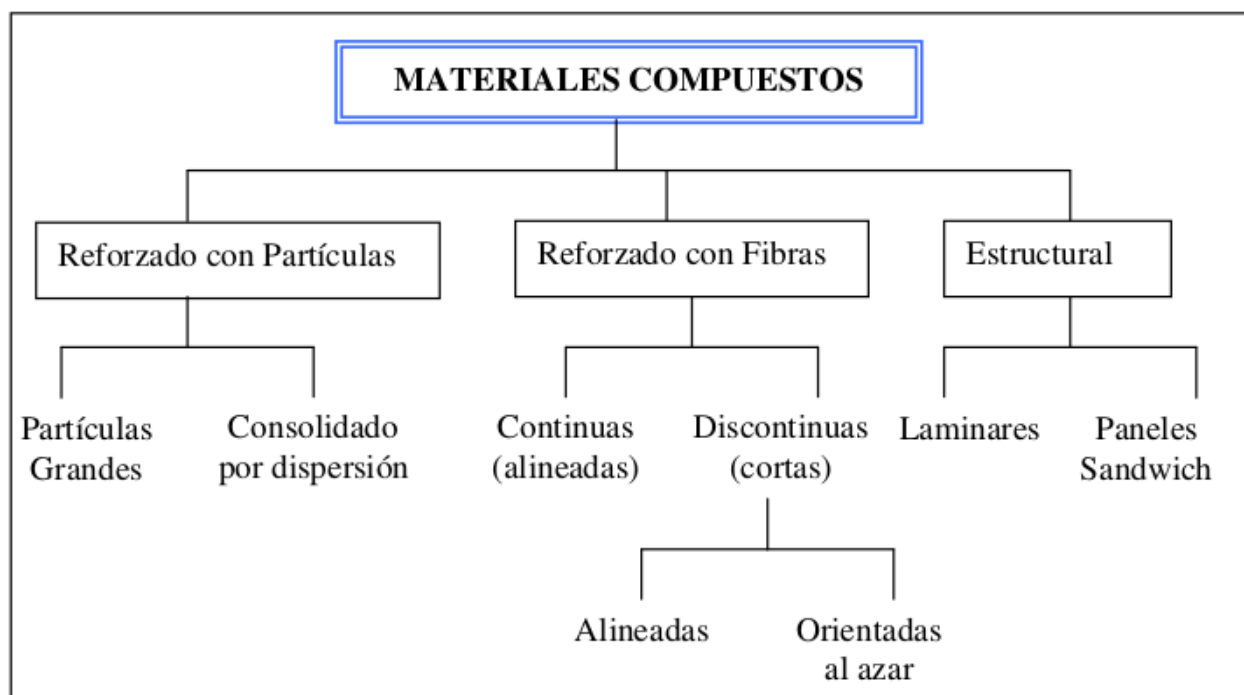
- **Fase Matriz:** Es continua, rodea a la otra fase (dispersa) y es dúctil. Aumenta la tenacidad e impide propagación de grietas entre partículas y las une, distribuye y transmite a la fase dispersa los esfuerzos externos, generalmente una pequeña porción del esfuerzo aplicado es soportado por la matriz. Se emplean polímeros (termoplásticos y termoestables) y metales (Al, Cu), porque son dúctiles.
- **Fase Dispersa:** Fibras o partículas que aumentan la resistencia y la rigidez del material. Tienen baja densidad, por lo que presentan alta resistencia específica y elevado módulo específico (resistencia/peso específico).

Las propiedades de los materiales compuestos son función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de las fases dispersas. Geometría de la fase dispersa se refiere a la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas.

CLASIFICACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

La Figura No 2 muestra un esquema simple para clasificar los materiales compuestos, el cual consta de tres divisiones:

Figura 2: Clasificación de Materiales Compuestos



REFORZADOS CON PARTÍCULAS

Las Partículas en estos materiales son equiaxiales, es decir, sus dimensiones son aproximadamente iguales en todas las direcciones.

PARTÍCULAS GRANDES

No se pueden describir a nivel atómico o molecular, sino mediante la mecánica continua. La fase dispersa (partículas) es más dura y resistente que la matriz, restringiendo el movimiento de la matriz.

La matriz transfiere parte del esfuerzo aplicado a las partículas, las cuales soportan una parte de la carga. La mejora del comportamiento mecánico depende de la fuerza de cohesión de la intercara matriz- partícula.

A continuación, se exponen algunos ejemplos de estos materiales.

Cermets

El Cermets que es un compuesto metal-cerámica, tiene partículas muy duras de carburos refractarios cerámicos: CW , CTi , embebidos en una matriz metálica de cobalto o níquel. Se utiliza para herramientas de corte para aceros endurecidos.

Las partículas duras de carburos aportan el efecto cortante a la superficie, pero al ser muy frágiles no pueden soportar solas los excesivos esfuerzos de corte; por este motivo la tenacidad se mejora incluyendo dichas partículas en una matriz metálica dúctil, que las separa e impide la propagación de grietas entre partículas. Todo el conjunto matriz-partículas tienen carácter refractario para resistir altas temperaturas que se generan por el corte de materiales muy duros.

Elastómeros reforzados con Negro de Humo

Los elastómeros, usados como cauchos se refuerzan con partículas de negro de humo. Éste contiene partículas pequeñas y esféricas de carbono producidas por combustión incompleta (poco aire) de gas natural u otros derivados del petróleo. El agregado de negro de humo, que es barato, al caucho vulcanizado aumenta la tenacidad y las resistencias a la tracción, a la torsión y al desgaste. Los neumáticos para coches contienen entre un 15 y 30% en volumen de negro de humo.

Hormigón

En el caso del hormigón, las fases matriz y dispersa son cerámicas. Es un material compuesto formado por un agregado de partículas de grava y arena unidas entre sí mediante cementos ya sean Pórtland o asfálticos.

El hormigón de cemento Pórtland empleado para la construcción de edificios, está compuesto por: agregado fino (arena), agregado grueso (grava), agua y cemento Pórtland.

El cemento Pórtland contiene: caliza (OCa), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de Fe (Fe_2O_3). Estas materias primas se muelen y mezclan en proporciones adecuadas para conseguir la composición deseada. La mezcla se coloca en un horno rotatorio a temperaturas de 1.400 a 1.650°C. Durante el proceso, la mezcla se convierte químicamente en clinker de cemento, que se enfría y posteriormente, se pulveriza. Se le adiciona una pequeña cantidad de yeso ($SO_4Ca.2H_2O$) para controlar el tiempo de fraguado del hormigón.

Los componentes del cemento Pórtland:

- C_3S : silicato tricálcico
- C_2S : silicato dicálcico
- C_3Al : aluminato tricálcico
- C_4AF : alumino ferritotetracálcico

El cemento portland endurece al reaccionar con agua, por reacciones de hidratación.

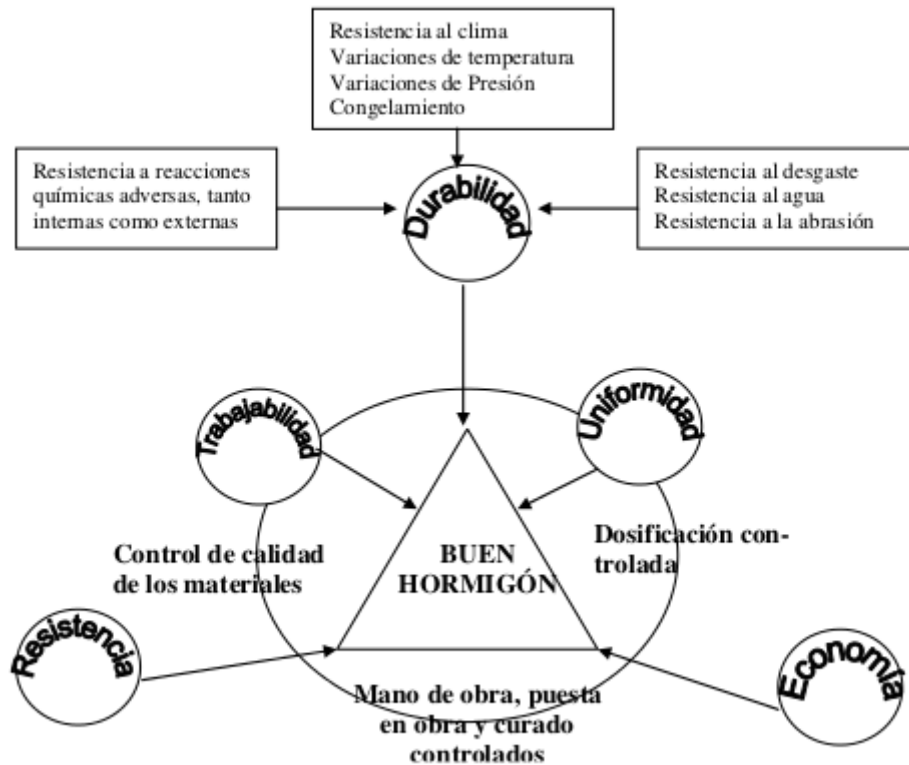
El hormigón asfáltico, empleado en pavimentos, parte del asfalto o betún, que es básicamente un hidrocarburo con algo de O_2 y S, más impurezas. Son polímeros desde bajos a altos pesos moleculares. El asfalto es el aglutinante bituminosos de agregados, formando una mezcla asfáltica.

La resistencia a la tracción del hormigón es 10 a 15 veces menor que su resistencia a la compresión; para aumentar su resistencia a la tracción se introducen barras de acero o alambre, obteniéndose Hormigón Armado. En el hormigón armado los esfuerzos de tracción son transmitidos desde el hormigón a las barras de acero como refuerzo a través de la unión.

La resistencia a la tracción del hormigón armado se puede mejorar además por la introducción de tensiones de compresión mediante pretensado o postensado utilizando refuerzos de acero denominados tendones. El tendón puede ser una barra o cable de acero tensado. La ventaja de este

hormigón es que las tensiones de compresión introducidas por los tendones de acero han de ser contra restadas cuando el hormigón es sometido a esfuerzos de tracción. En el hormigón pretensado los tendones son tensados entre una anclaje externo y un gato ajustable mediante el cual se aplica tensión. A continuación se vierte el hormigón sobre los tendones que se encuentran tensados a tracción. Cuando el hormigón alcanza la resistencia requerida, se descarga la tensión del gato. Los cables de acero deberían encojerse entonces elásticamente pero no es posible porque están unidos al hormigón. De esta manera se producen tensiones de compresión en el interior del hormigón.

Figura 3: Propiedades generales del hormigón



CONSOLIDADOS POR DISPERSIÓN

Las partículas de los materiales compuestos consolidados por dispersión son muy pequeñas (= 10-100 mm) y la interacción matriz - partícula que conduce a la consolidación ocurre a nivel atómico o molecular.

El mecanismo de consolidación es similar al de endurecimiento por precipitación. La matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada y las pequeñas partículas dispersas dificultan o impiden el desplazamiento de dislocaciones, por lo que disminuye la deformación plástica, aumenta el LE, la ET y la dureza.

La fase dispersa puede ser metálica o no. En el caso de la fase metálica se usan generalmente óxidos.

El aumento de resistencia se produce por las interacciones entre partículas y dislocaciones que circulan por la matriz, similar al mecanismo de endurecimiento por precipitación. A pesar de que el endurecimiento asfáltico por dispersión es menor que el de endurecimiento por precipitación, sin embargo el incremento de resistencia se mantiene a elevada temperatura durante largos periodos de tiempo, porque las partículas dispersas no tienen reactividad con la fase matriz. En cambio, en las aleaciones endurecidas por precipitación el incremento de resistencia desaparece por tratamiento térmico debido al crecimiento del precipitado o de la disolución de la fase precipitada.

Por ejemplo, la resistencia a altas temperaturas de las aleaciones de Ni aumenta con la adición de partículas finamente dispersas de torio (ThO_2).

REFORZADO CON FIBRAS

La fase dispersa tiene la **geometría de una fibra**, es decir, una relación longitud-diámetro muy alta.

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



Figura 4: Rollo de fibra de vidrio

FASE FIBROSA

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

En función de sus **diámetros y características**, las fibras se agrupan en tres categorías:

- **Whiskers:** **monocristales** muy delgados que tienen una relación longitud – diámetro muy grande. Como consecuencia de su pequeño diámetro tienen alto grado de perfección cristalina y están prácticamente libres de defectos, y por ello tienen resistencias excepcionalmente elevadas. Pueden ser de **grafito, carburo de silicio, nitruro de silicio y óxido de aluminio**. Desventajas: **difícil incorporación en la matriz y costo elevado**.
- **Fibras:** **policristalinos o amorfos**. Tienen diámetros pequeños. Generalmente son polímeros o cerámicas como **aramidas, vidrio, carbono, boro, óxido de aluminio y carburo de silicio**.
- **Alambre:** Diámetros relativamente grandes. Los materiales típicos son el acero, el molibdeno y el tungsteno. Se utilizan como refuerzos **radicales de acero en los neumáticos de automóvil**, filamentos internos de los recubrimientos de cohetes espaciales y paredes de mangueras de alta presión.

FASE MATRIZ

La fase matriz en un material compuesto con fibras ejerce varias funciones. En primer lugar **une las fibras y** actúa como un medio que **distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados**. Solo una pequeña fracción del esfuerzo es resistido por la matriz. Además, la matriz debe ser dúctil y, por otra parte, el módulo elástico de la fibra debe ser mucho mayor que el de la matriz.

En segundo lugar, **la matriz protege las fibras del deterioro superficial** que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente. Estas interacciones introducen

defectos superficiales capaces de originar grietas, que podrían producir fallas con esfuerzos de tracción relativamente bajos. Finalmente, la matriz separa las fibras y en virtud de su relativa blandura y plasticidad impide la propagación de grietas.

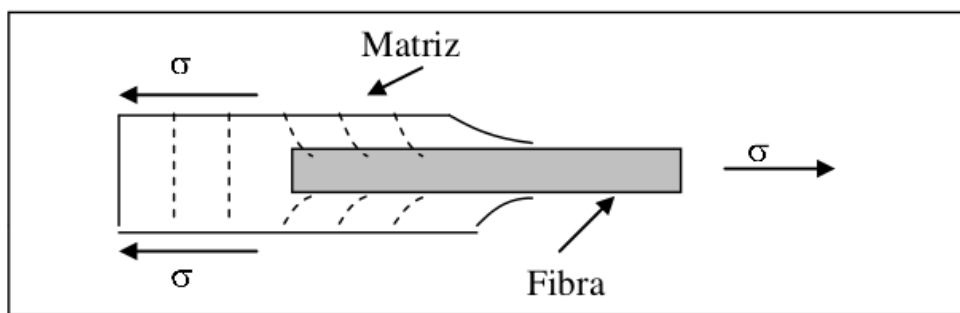
Es importante la adherencia entre la fibra y la matriz, para evitar el arrancado de fibras. La resistencia a la tracción final del compuesto depende en gran parte, de la unión; una unión adecuada es esencial para optimizar la transmisión de esfuerzos desde la matriz a las fuertes fibras.

Generalmente se utilizan polímeros (termoplásticos y termoestables) y metales como matriz, porque son materiales dúctiles. El aluminio y el cobre son los metales más utilizados para ser reforzados con fibras.

INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LA FIBRA

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

Figura 5: Patrón de deformación en una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción.



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

$$l_c = \frac{\sigma_f \cdot d}{\tau_c}$$

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

INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN Y DE LA CONCENTRACIÓN DE LA FIBRA

La disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras. Con respecto a la orientación existen dos situaciones extremas:

- Alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras
- Alineación al azar

Las **fibras continuas normalmente se alinean**, mientras que las fibras discontinuas se pueden alinear o bien se pueden orientar al azar o alinearse parcialmente. **Las mejores propiedades de los materiales compuestos se consiguen con la distribución uniforme de la fibra.**

Materiales compuestos con fibras continuas y alineadas

Carga Longitudinal. Las propiedades de un compuesto con fibras alineadas tienen carácter altamente **anisotrópico**. Conviene considerar la deformación de este tipo de compuestos originada por un esfuerzo aplicado a lo largo de la dirección de alineamiento, la dirección longitudinal y **suponer que la unión matriz-fibra es muy fuerte, de modo que la deformación es la misma para ambas.**

De esta forma, la **carga soportada por el compuesto F_c** es igual a las **cargas soportadas por la Fase Matriz F_m y por la Fase Fibra F_f .**

$$F_c = F_m + F_f \quad (1)$$

Teniendo en cuenta la definición de esfuerzo, $F = \sigma A$,

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_m \cdot A_m + \sigma_f \cdot A_f \quad (2)$$

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

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \cdot \frac{A_f}{A_c} \quad (3)$$

donde **A_m/A_c y A_f/A_c son las fracciones de área de la matriz y de la fibra**, respectivamente. Si las **longitudes del compuesto, de la matriz y de las fibras son iguales**, **A_m/A_c es equivalente a la fracción de volumen de la matriz V_m** , y la otra relación es igual a **V_f** . Por lo que,

$$\sigma_c = \sigma_m \cdot V_m + \sigma_f \cdot V_f \quad (4)$$

En un estado de **isodeformación** se cumple

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \quad (5)$$

y si cada término de (4) se divide por su respectiva deformación,

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} \cdot V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} \cdot V_f \quad (6)$$

Además, si las deformaciones del compuesto, de la matriz y de la fibra son elásticas, siendo E los módulos de elasticidad de cada fase, se cumple:

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad (7)$$

Dado que

$$V_m + V_f = 1 \quad (8)$$

$$E_c = E_m (1 - V_f) + E_f V_f \quad (9)$$

En consecuencia, **el módulo de elasticidad de un material compuesto reforzado con fibras continuas y alineadas en la dirección de alineamiento es igual a las fracciones de volumen multiplicadas por los módulos de elasticidad de ambas fases.**

Carga transversal. La carga se aplica perpendicularmente a la dirección de la fibra alineada. En esta condición, el compuesto y ambas fases están expuestos al **mismo esfuerzo σ** .

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad (10)$$

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

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \cdot V_m + \varepsilon_f \cdot V_f \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (12)$$

$$\frac{\sigma}{E_c} = \frac{\sigma}{E_m} \cdot V_m + \frac{\sigma}{E_f} \cdot V_f \quad (13)$$

Dividiendo ambos miembros por el esfuerzo σ .

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (14)$$

Materiales compuestos con fibras discontinuas y orientadas al azar

Generalmente, cuando los materiales compuestos tienen fibras orientadas al azar, éstas suelen ser discontinuas y cortas. En estas circunstancias, el módulo elástico se expresa mediante una “regla de las mezclas”:

$$E_c = K E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (15)$$

En esta expresión K es el parámetro de eficiencia de la fibra, que depende de V_f y de la relación E_f/E_m . Esta magnitud es inferior a la unidad y ordinariamente del orden de 0,1 a 0,6. El módulo elástico de los materiales reforzados, tanto si las fibras están alineadas como si están orientadas al azar, aumenta al incrementarse la fracción de volumen de la fibra.

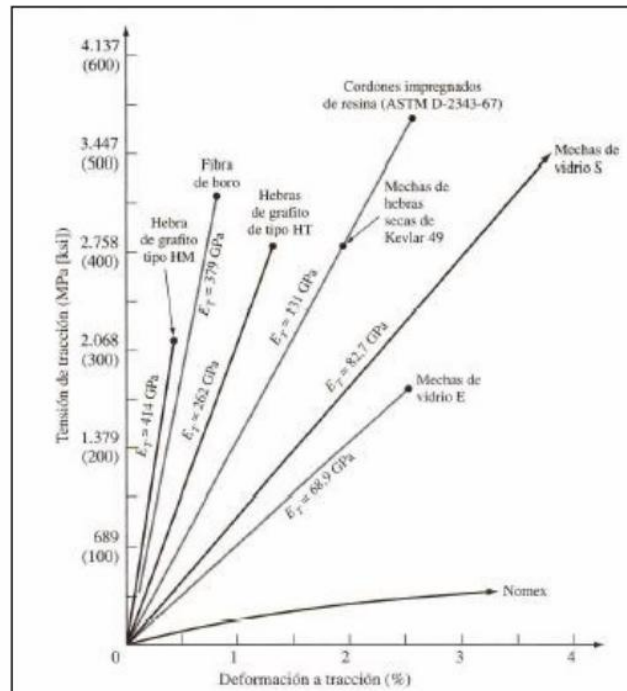
TIPOS PRINCIPALES DE FIBRAS SINTÉTICAS

Como se mencionó anteriormente, el vidrio, la aramida (polímero aromático de poliamida con una estructura molecular muy rígida) y el carbono. La primera, es la más extendida para el refuerzo de plásticos, siendo también la más económica. La aramida y el carbono son fibras muy consistentes y de baja densidad, por lo que tienen múltiples aplicaciones, particularmente en el ámbito aeroespacial, a pesar de su elevado costo.

Como se observa en la Gráfico No2, las fibras de carbono proporcionan la mejor combinación de alta resistencia, alta rigidez (módulo alto), y baja densidad, pero tienen alargamientos bajos.

La fibra de aramida Kevlar 49 posee una combinación de alta resistencia a la tensión, alto módulo, baja densidad y alto alargamiento (resistencia al impacto).

Las fibras de vidrio poseen tensión de rotura y módulos más bajos y densidades más altas. Entre estas fibras, las de tipo S tienen mayores tensiones de rotura y alargamiento que las fibras de vidrio tipo E. Debido al menor costo de las fibras de vidrio, su utilización es mucho mayor.

Gráfico 2: Comportamiento tensión de tracción- deformación de varios tipos de fibras de refuerzo.

Las dos **matrices plásticas** más importantes para plásticos reforzados son las **resinas epoxi y poliéster insaturadas**. Las tipo **poliéster son más baratas**, pero generalmente no son tan fuertes como las resinas epoxi. Los poliéster insaturados son de amplia utilización en plásticos reforzados con fibras. Entre sus aplicaciones tenemos su empleo en cascos de buques, paneles de construcción y paneles estructurales para automóviles, aeronaves y accesorios. **Las resinas epoxi son más caras pero tienen ventajas especiales tales como buenas propiedades de tensión de rotura y más baja contracción después del curado que las resinas de poliéster**. Las resinas epoxi se utilizan usualmente como materiales matriz para materiales compuestos de fibra de carbono y aramidas.

Tabla 1: Comparación de propiedades de fibras

Propiedad	Vidrio E	Carbono (tipo HT)	Aramida (Kevlar 49)
Resistencia a la tracción ksi (MPa)	450 (3100)	500(3450)	525(3600)
Módulo a tracción Msi (Gpa)	11,0 (76)	33 (228)	19 (131)
% de alargamiento a la fractura	4,5	1,6	2,8
Densidad (g/cm ³)	2,54	1,8	1,44

A continuación, se exponen más detalles sobre la fibra de vidrio y de carbono.

Fibras De Vidrio

La fibra de vidrio es un material compuesto consistente en **fibras continuas o discontinuas de vidrio embebidas en una matriz plástica**. Por otro lado, es una fibra de origen inorgánico (mineral) que se **utiliza a gran escala en los tejidos corrientes**. Se fabrica **moldeando o soplando el vidrio fundido hasta formar hilos**.

El plástico reforzado con fibra de vidrio combina la alta resistencia de las delgadas fibras de vidrio con la ductilidad y la resistencia química del plástico. El vidrio se utiliza como material de refuerzo debido a las siguientes razones:

- Es fácilmente hilable en fibras de alta resistencia.
- Es fácilmente disponible y se puede aplicar económicamente para producir plástico reforzado con vidrio utilizando una gran variedad de técnicas de fabricación de materiales compuestos.

Como fibra es relativamente fuerte y, cuando está embebido en una matriz plástica produce un compuesto con muy alta resistencia específica. Cuando está unido a varios plásticos se obtienen materiales compuestos químicamente inertes muy útiles en una gran variedad de ambientes corrosivos.

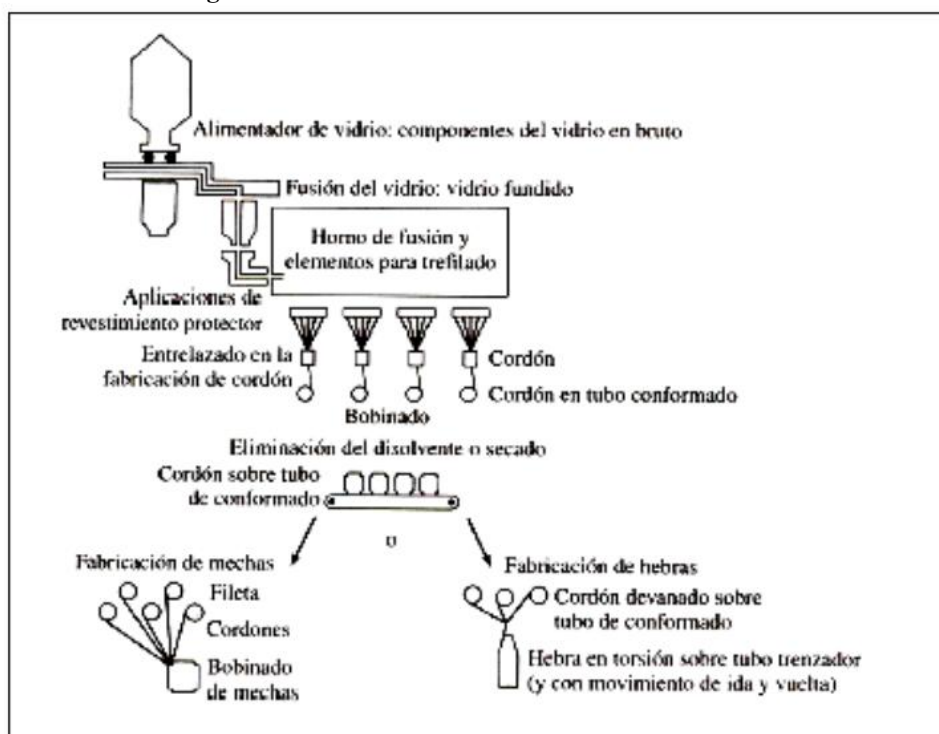
Las características superficiales de la fibra de vidrio son de extrema importancia porque los defectos superficiales afectan a las propiedades de tracción. Los defectos superficiales se generan por fricción o por abrasión de la superficie con otros materiales duros. Además, las superficies de vidrio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

Las fibras recién solidificadas se suelen recubrir durante el hilado con un material que protege la superficie del deterioro y facilita la unión entre la fibra y la matriz. Gran número de diferentes materiales plásticos se utilizan como matriz de la fibra de vidrio, pero el más común es el poliéster.

Recientemente ha aparecido un compuesto formado por una matriz de nylon reforzada con fibras de vidrio; este material es extremadamente fuerte y altamente resistente al impacto.

Conformación de Fibras de Vidrio. Las fibras de vidrio se producen mediante el estirado de monofilamentos de vidrio que provienen de un horno que contiene vidrio fundido; reuniendo un elevado número de esos filamentos se forma un cordón de fibras de vidrio. .

Figura 6: Proceso de manufactura de fibra de vidrio



Los cordones son posteriormente utilizados para hacer hebras de fibra de vidrio o mechas que constan de una colección de haces de filamentos continuos o entretejidos para formar mechas urdidas.

Las mallas para reforzar las fibras, están hechas de cordones continuos o cortados. Dichos cordones están generalmente unidos por una sustancia resinosa. Las mallas combinadas están hechas con mechas entrelazadas, químicamente enlazadas a las mallas de cordones cortados.

Fibras De Carbono

Las fibras de vidrio tienen **menor resistencia y módulo de tensión que las fibras de carbono y aramida, aunque poseen una mayor elongación**. La densidad de las fibras de vidrio es también mayor que las de aramida y carbono. A pesar de todo, y debido a su bajo costo y versatilidad, son las fibras de vidrio las más comúnmente utilizadas en el reforzado de plásticos.

Los materiales compuestos fabricados a base de fibras de carbón reforzando matrices resinosas de naturaleza plástica como las epoxi, se caracterizan por ser una combinación de **escaso peso, alta resistencia y tenacidad (módulo de elasticidad)**. Por eso dichos materiales son aptos para **aplicaciones aeroespaciales**, pero el elevado precio de la fibra de carbono limita **su uso en algunas industrias como la del automóvil**.

Proceso de Producción de Fibras de Carbono. Los dos materiales que se emplean como precursores para las fibras de carbono son el poliacrilonitrilo (PAN) y la brea.

La elaboración a partir del poliacrilonitrilo consta de las siguientes etapas, las cuales se muestran en la Figura 7.

Las etapas de elaboración, que se observan en la figura 7, son:

1. Estabilización: consiste en estirar las fibras (PAN) para formar una malla o red fibrilar, paralelamente a un eje, y luego son oxidadas en aire a una temperatura de 200 a 220°C mientras se mantiene la tensión.
2. Carbonización: Las fibras ya estabilizadas son calentadas hasta su transformación en fibra de carbono mediante la eliminación de O, H y N de la fibra original. El tratamiento de carbonización con calor se lleva a cabo normalmente en una atmósfera inerte de 1.000 a 1.500°C. Durante la carbonización se forman hebras o cintas de estructuras estratificadas como el grafito dentro de cada fibra, aumentando enormemente la resistencia a la tensión del materia.
3. Grafitización: Se emplea si lo que se desea es un aumento del módulo de elasticidad a expensas de una alta resistencia a la tracción. Durante la grafitización, que es llevada a cabo a una temperatura superior a los 1.800°C, aumenta el grado de orientación preferido de los cristales tipo grafito dentro de cada fibra.

En general, las fibras de carbono de mayores módulos de elasticidad tienen menores tensiones de roturas y viceversa.

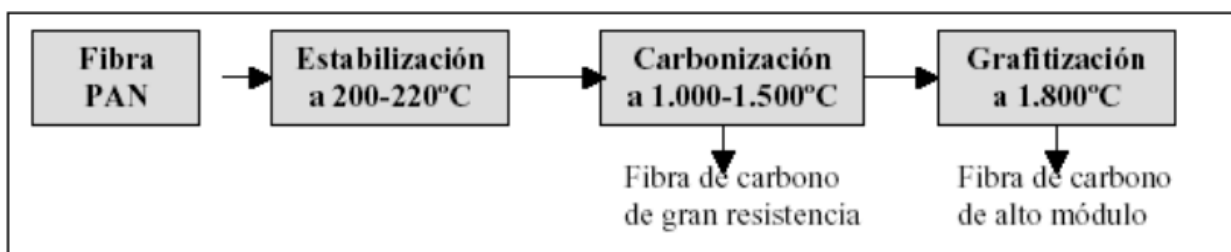


Figura 7: Etapas del proceso de fabricación de fibras de carbono de alta resistencia y de alto módulo a partir de poliacrilonitrilo (PAN) como material precursor.

Un haz o cordón forma un grupo de alrededor de 6.000 fibras de carbono.

Por otro lado, si se desea una ebra de carbono de muy alta resistencia, se puede eliminarla grafitización. Sin embargo, si se desea un alto módulo, se deben realizar las tres etapas.

El carbono en forma de fibra tiene un módulo específico mucho mayor que el vidrio. El carbono tiene también mayor resistencia a elevada temperatura y a ambientes corrosivos y sólo se utiliza como fibra corta. La industria aeronáutica utiliza compuestos reforzados con carbono para fabricar los componentes estructurales de sus nuevos aviones con el fin de disminuir el peso.

Fibras De Aramida

Fibra de aramida es el nombre genérico de las fibras de poliamida aromáticas. Entre los tipos comerciales se encuentra el Kevlar 29, de baja densidad y alta resistencia y ha sido especialmente diseñado para aplicaciones tales como protección en balística, cuerdas y cables.

Otro material es el Kevlar 49, con baja densidad, alta resistencia y alto módulo. Se usan para refuerzo de plásticos en compuestos de interés aeroespacial, en marina, en automoción y otras aplicaciones industriales.

Enlaces químicos en fibras de aramida. Son de dos tipos:

- Dentro de las Fibras: enlaces por puente de hidrógeno mantienen la cohesión transversal de las cadenas poliméricas. Por esto, estas fibras tienen mayor resistencia en dirección longitudinal que en dirección transversal.
- Entre las Fibras: la estructura de anillo aromático proporciona mayor rigidez a las cadenas poliméricas, haciendo que éstas exhiban una estructura a modo de barra.

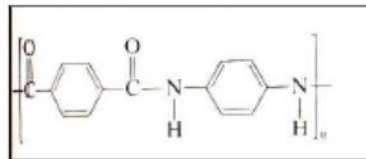


Figura 8: Unidad estructural repetitiva de las fibras de Kevlar

CONFORMACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS

Para la fabricación de plásticos reforzados con fibras, éstas deben estar uniformemente distribuidas en la matriz y en muchos casos, deben estar orientadas en la misma dirección. Las nuevas técnicas desarrolladas para conformar estos materiales son: pultrusión, bobinado de filamentos y procesos de producción con preimpregnados.

Pultrusión

Es una técnica desarrollada para fabricar componentes de forma alargada y de sección constante. En esta técnica, fibras continuas se impregnan primero con una resina termoestable y luego se las hace pasar (por tracción) a través de un molde matriz de acero que las conforma en una preforma y establece la relación resina-fibra. Luego, el material pasa a través de un molde de curado que esta mecanizado de forma precisa para que imparta la forma final deseada. Este molde también se calienta para iniciar el curado de la resina.

Un mecanismo de tracción arrastra el material a través de los moldes y también determina la velocidad de producción. La pultrusión es un proceso continuo susceptible de ser mecanizado; las velocidades de producción son relativamente elevadas y el costo es bajo. Se consiguen perfiles de longitud ilimitada con una gran variedad de formas.

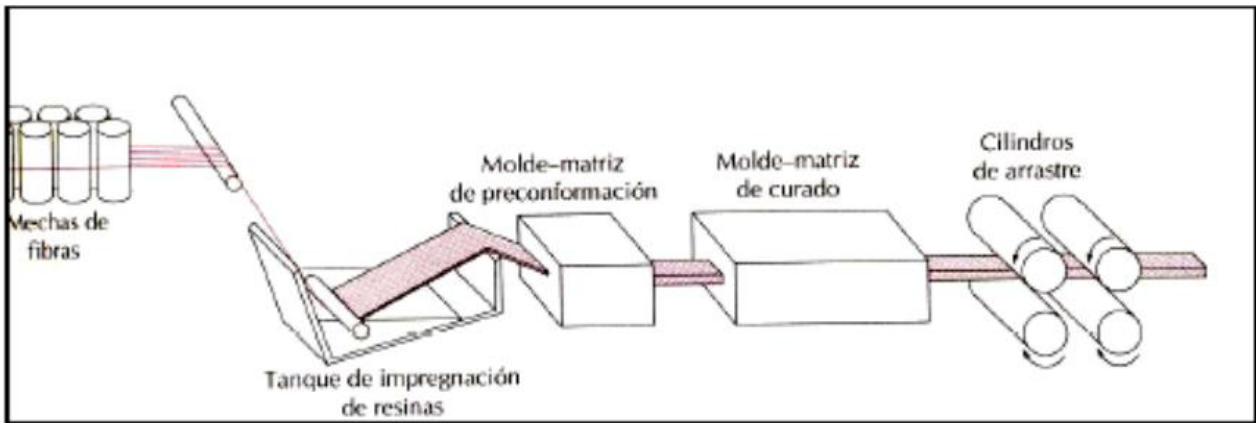


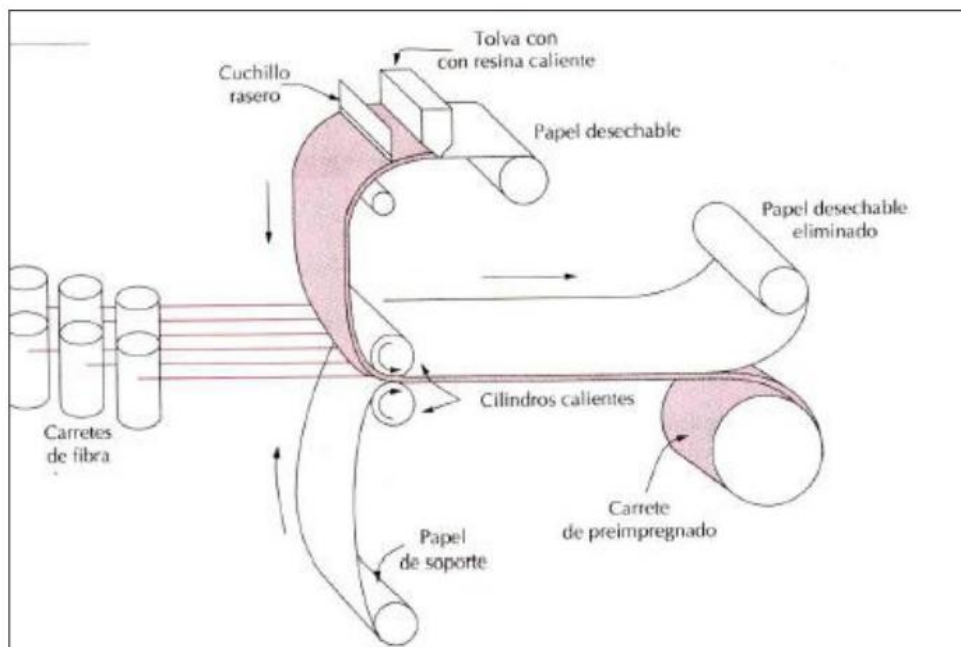
Figura 9: Diagrama Esquemático del Proceso de Pultrusión

Procesos de producción con preimpregnados

Las fibras continuas impregnadas previamente con una resina polimérica parcialmente curada, se entregan a los usuarios en forma de cinta, los cuales moldean y curan totalmente el producto sin necesidad de añadir ninguna resina. Tiene numerosas aplicaciones estructurales.

El proceso de preimpregnación, representado en la figura 10 para polímeros termoestables, comienza con una alineación paralela de una serie de fibras continuas devanadas en carretes. Estas fibras se colocan entre dos hojas de papel, una desechable y otra de soporte, y se prensan mediante rodillos calientes en un proceso llamado “calandrado”. El producto preimpregnado final- una delgada cinta que consiste en fibras continuas y alineadas embebidas en una resina parcialmente curada se prepara para el empaquetamiento por bobinado en un núcleo de cartón.

Figura 10: Diagrama esquemático de producción de cinta de preimpregnado utilizando polímeros termoestables



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

La fabricación propiamente dicha comienza con la aplicación de la cinta de preimpregnado sobre las superficies que actúan como molde. El número de capas que se aplica (después de quitar el papel de soporte) es el necesario para obtener el espesor deseado. La orientación de las fibras puede ser

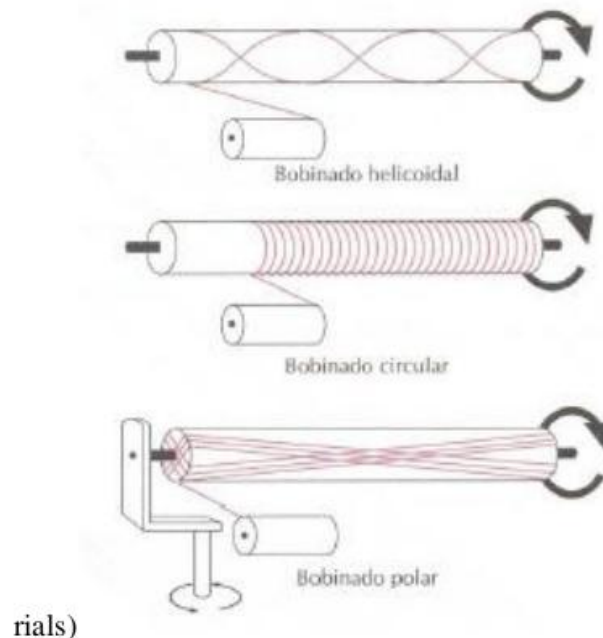
unidireccional o multidireccional. El curado final se logra aplicando simultáneamente calor y presión.

Bobinado de filamentos

Éste es un proceso por el cual las fibras continuas se colocan cuidadosamente según un modelo predeterminado, usualmente en forma de cilindro hueco. Las fibras, sean de filamentos individuales o mechas, se hacen circular por un baño de resina líquida y después se bobinan de modo continuo sobre un mandril mediante un equipo automático. Después de aplicar el número apropiado de capas, se lleva a cabo el curado en un horno, o incluso a temperatura ambiente, y luego se saca del mandril. Como procedimiento alternativo, pueden bobinarse filamentos mediante cintas delgadas y estrechas de preimpregnados de menos de 10 mm de anchura. Son posibles varios modelos de

bobinado (circular, helicoidal y polar) para conseguir las propiedades mecánicas previstas. Piezas de filamentos bobinados tienen una relación resistencia peso bastante elevada. Con esta técnica también se consigue un alto grado de control sobre la uniformidad del bobinado y la orientación. Cuando se automatiza el proceso resulta muy económico.

Figura 11: Representación esquemática de las técnicas de bobinado de filamentos helicoidal, circular y polar (De N. L. Hancox, editor, Fibre Composite Hybrid Mate-



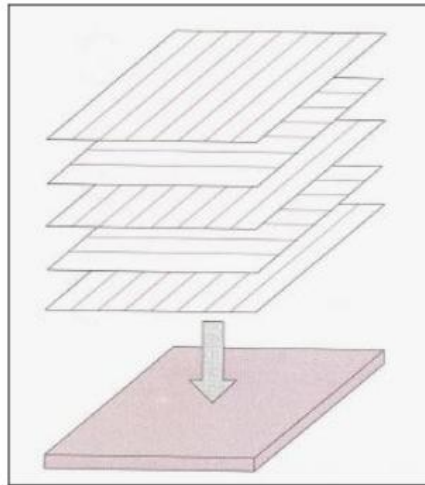
MATERIALES COMPUESTOS ESTRUCTURALES

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

MATERIALES COMPUESTOS LAMINARES

Un material compuesto laminar consta de láminas o paneles que tienen una dirección preferente con elevada resistencia, tal como ocurre en la madera y en los plásticos reforzados con fibras continuas y alineadas. Las capas se apilan y luego se pegan entre sí, de modo que la orientación de la dirección de elevada resistencia varía en cada una de las sucesivas capas. Por ejemplo, en la madera contrachapada, las direcciones de elevada resistencia de las sucesivas capas forman ángulos rectos entre sí.

Figura 12: Apilamiento de capas reforzadas en sucesivas orientaciones para construir un material laminar



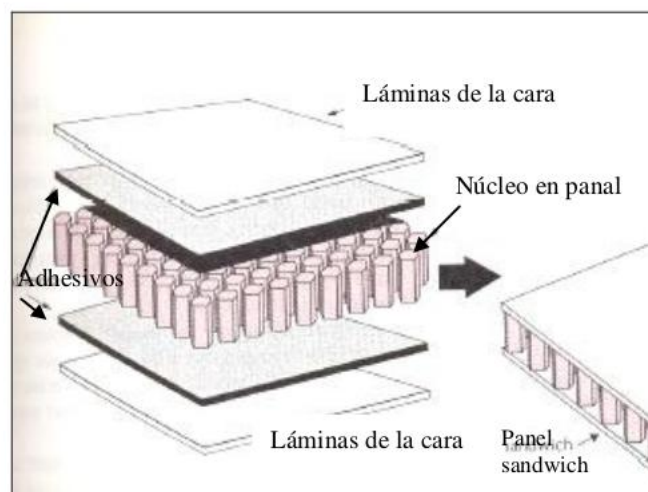
PANELES SÁNDWICH

Se consideran un tipo de materiales compuestos estructurales y consisten en **dos láminas externas fuertes**, o caras, separadas por una **capa de material menos denso, o núcleo**, que tiene **baja rigidez y baja resistencia**. Las **caras resisten la mayor parte de las cargas en el plano**, y también cualquier **esfuerzo de flexión transversal**. Los materiales de las **caras** suelen ser **aleaciones de aluminio, plásticos reforzados con fibras, titanio, acero y madera contrachapada**.

Estructuralmente, el **núcleo tiene dos funciones**. Por un lado **separa las caras y resiste la deformación perpendicular al plano de la cara**. Por otro lado, aporta **cierto grado de resistencia a la cizalladura a lo largo de planos perpendiculares a las caras**. Como **núcleo** se utilizan varios tipo de materiales y estructuras como **polímeros espumosos cauchos sintéticos, cementos orgánicos y madera balsa**.

Otro material popular es una estructura “en panal”: delgadas láminas dispuestas en forma de celdillas hexagonales trabadas con sus ejes perpendiculares a los planos de las caras.

Figura 13: Diagrama esquemático de la fabricación de un panel sándwich con un núcleo en panal
(Reproducido con permiso de Engineering Material Handbook)



MADERA

La madera es un material ampliamente utilizado en ingeniería. Además del uso de la madera en carpintería, en la construcción de casas, edificios y puentes, la madera se emplea para formar materiales compuestos como contrachapados, tableros de aglomerado y papel.

Es un material compuesto natural que está formado principalmente por una compleja disposición de células de celulosa armadas con una sustancia polimérica denominada lignina y otros compuestos orgánicos.

MACROESTRUCTURA DE LA MADERA

Este producto natural tiene una estructura compleja, y por lo tanto no debe esperarse que se comporte como un producto homogéneo como el acero. Por lo que, la resistencia de la madera es fuertemente anisotrópica, con una resistencia a la tracción mucho mayor en la dirección paralela al tronco del árbol.

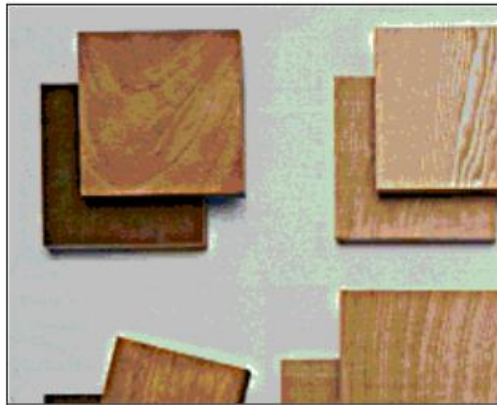
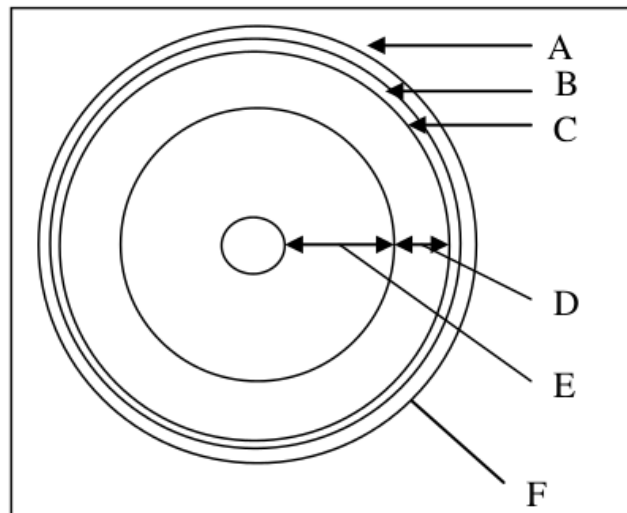


Figura 14: Tipos de madera :El nogal americano tiene una madera dura de gran resistencia empleada para mangos de herramientas y muebles.. Los fabricantes de instrumentos musicales aprecian mucho la madera de cerezo. El roble es una de las maderas más duraderas: se emplea en tonelería, chapado y revestimiento de suelos. El alerce es una madera resistente relativamente barata empleada en la construcción y en la fabricación de papel.

CAPAS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

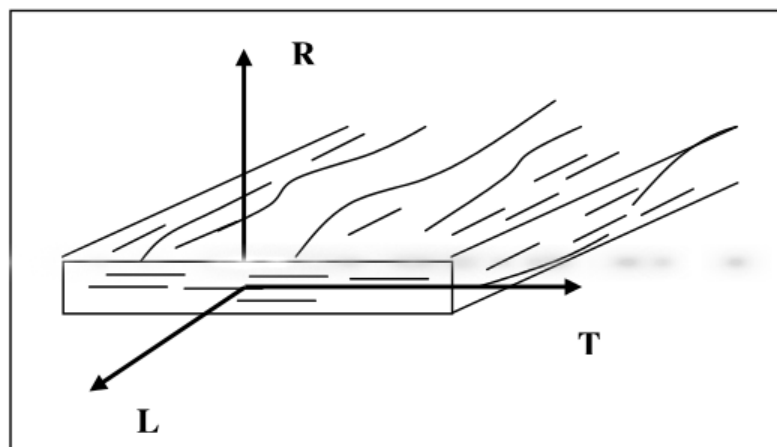
- A. *Capa de la corteza exterior:* constituida por tejido muerto y seco, da protección al árbol.
- B. *Capa de corteza interior:* húmeda y blanda, transporta el alimento a todas las partes en crecimiento del árbol.
- C. *Capa de cambium:* capa de tejido entre la corteza y el tronco formada por las células de ambos.
- D. *Albura:* Parte ligeramente coloreada que forma la parte exterior del tronco del árbol. Contiene algunas células vivas que conducen la savia desde las raíces hasta las hojas.
- E. *Duramen:* es la región interna del árbol más antigua, no está viva. Proporciona resistencia al árbol.
- F. *Médula:* es el tejido blando situado en el centro del árbol alrededor del cual se produce el primer crecimiento del árbol.

Figura 15: Esquematación de la sección transversal de un árbol**MADERAS BLANDAS Y MADERAS DURAS**

La base botánica para esta clasificación es que si la semilla está descubierta, se trata de árbol de madera blanda (abetos, pinos, cedros), mientras que si está cubierta, es del tipo de madera dura (robles, olmos, cerezos, abedules).

EJES DE SIMETRÍA

Es importante ser capaz de relacionar las direcciones en un árbol con su microestructura. Para ello se elige un conjunto de ejes como los indicados en la Figura 16. El eje paralelo al tranco se denomina longitudinal (L), mientras que el eje perpendicular al anillo anual de crecimiento del árbol se llama eje radial (R). El tercer eje, tangencial, es perpendicular a ambos, longitudinal y radial.

**Figura 16: Ejes en la madera****MICROESTRUCTURA DE LA MADERA****MADERAS BLANDAS**

La madera blanda consta principalmente de células tubulares de paredes delgadas llamadas traqueidas, las cuales ocupan el 90 % del volumen. El gran espacio abierto entre en el centro de las células se denomina lumen y se utiliza para la conducción de agua. Las células de madera temprana tienen un diámetro relativamente grande, paredes delgadas y un lumen de gran tamaño. Las células

de madera tardía tienen un diámetro más pequeño, paredes gruesas un tamaño de lumen también más pequeño.

MADERAS DURAS

A diferencia de las blandas, las maderas duras tienen vasos de gran diámetro para la conducción de fluidos, pudiendo ser de poros en anillo o de poros diseminados, dependiendo de cómo los vasos estén distribuidos en los anillos de crecimiento. Las células longitudinales responsables de la sustentación del tronco del árbol de madera dura son células alargadas terminadas en punta y normalmente de paredes gruesas.

PROPIEDADES DE LA MADERA

CONTENIDO DE HUMEDAD

La madera antes de ser secada contiene humedad. El agua se halla en la madera absorbida en las fibras de las células o bien como agua libre en el lumen de las fibras. Por convenio, el porcentaje de agua en la madera se define por la ecuación:

$$\text{Contenido de humedad (\% en peso)} = \frac{\text{peso de agua en la muestra}}{\text{peso de la muestra de madera seca}} \cdot 100\%$$

Debido a que el porcentaje de agua se calcula sobre base seca el contenido de humedad en la madera puede superar el 200%.

RESISTENCIA MECÁNICA

En general, las maderas clasificadas como blandas son físicamente blandas, y de igual forma para las duras, aunque existen algunas excepciones.

La resistencia a la compresión de la madera en la dirección paralela al grano es aproximadamente en un factor 10 superior a la resistencia a la compresión en dirección perpendicular al grano. En la dirección longitudinal la diferencia se debe principalmente a la fuerza de los enlaces covalentes de las microfibrillas de celulosa que en su mayor parte están orientadas longitudinalmente. A diferencia, en la dirección perpendicular las células están unidas por enlaces tipo puente de hidrógeno.

CONTRACCIÓN

La madera verde se contrae a medida que se eliminan de ella la humedad, creándose una distorsión en la madera, para las direcciones radial y tangencial de una sección transversal de un árbol. La madera se contrae considerablemente más en la dirección transversal (10- 15%) que en la dirección longitudinal (0,1%).