



Materiales y materias primas

Materiales compuestos

Capítulo 10

Guía didáctica
Autor | Franco Stupenengo

Autoridades

Presidente de la Nación

Dra. Cristina Fernández de Kirchner

Ministro de Educación

Dr. Alberto E. Sileoni

Secretaría de Educación

Prof. María Inés Abrile de Vollmer

Directora Ejecutiva del Instituto Nacional de Educación Tecnológica

Lic. María Rosa Almandoz

Director Nacional del Centro Nacional de Educación Tecnológica

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Director Nacional de Educación Técnico Profesional y Ocupacional

Ing. Roberto Díaz

Ministerio de Educación.

Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Saavedra 789. C1229ACE.

Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

República Argentina.

2011

Director de la Colección:

Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Coordinadora general de la Colección:

Claudia Crowe

Diseño didáctico y corrección de estilo:

Lic. María Inés Narvaja

Ing. Alejandra Santos

Coordinación y producción gráfica:

Augusto Bastons

Diseño gráfico:

María Victoria Bardini

Augusto Bastons

Martín Alejandro González

Federico Timerman

Ilustraciones:

Diego Gonzalo Ferreyro

Martín Alejandro González

Federico Timerman

Administración:

Cristina Caratozzolo

Néstor Hergenrether

Colaboración:

Jorgelina Lemmi

Psic. Soc. Cecilia L. Vázquez

Dra. Stella Maris Quiroga

“Colección Encuentro Inet”.

Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum.

Coordinadora general de la Colección: Claudia Crowe.

Queda hecho el depósito que previene la ley N° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

Reproducción autorizada haciendo mención de la fuente.

Industria Argentina

ADVERTENCIA

La habilitación de las direcciones electrónicas y dominios de la web asociados, citados en este libro, debe ser considerada vigente para su acceso, a la fecha de edición de la presente publicación. Los eventuales cambios, en razón de la caducidad, transferencia de dominio, modificaciones y/o alteraciones de contenidos y su uso para otros propósitos, queda fuera de las previsiones de la presente edición. Por lo tanto, las direcciones electrónicas mencionadas en este libro, deben ser descartadas o consideradas, en este contexto.

Colección Materiales y materias primas

Serie producida por el Canal Encuentro junto con el Instituto Nacional de Educación Tecnológica (INET). A lo largo de catorce capítulos* el ciclo desarrolla el origen, las propiedades, el contexto de descubrimiento y la utilización de diferentes materiales y materias primas, y el impacto que causaron en la vida de la humanidad durante su historia.

Aire, aluminio, hierro, azufre, polímeros, madera, cerámicos son algunos de los protagonistas de esta colección.

DVD 1

Capítulo 1
Los Materiales y la humanidad

Capítulo 2
Aire

Capítulo 3
Madera

DVD 2

Capítulo 4
Azufre

Capítulo 5
Minerales de hierro

Capítulo 6
Cerámicos

Capítulo 7
Aluminio

DVD 3

Capítulo 8
Biomateriales

Capítulo 9
Polímeros

Capítulo 10
Materiales compuestos

DVD 4

Capítulo 11
Silicio

Capítulo 12
Nanomateriales

* La versión impresa de la colección **Materiales y materias primas** está constituida por doce capítulos. La parte 1 y 2 de las series **Los materiales y la humanidad** y **Nanomateriales** fueron unificadas respectivamente.

Índice | Materiales compuestos

Mapa conceptual

10.1. ¿Qué son los materiales compuestos?

10.2. ¿Cuáles son los componentes de los materiales compuestos?

- ♦ 10.2.1. La matriz
 - 10.2.1.1. Propiedades de las matrices
- ♦ 10.2.2. El material de refuerzo
 - 10.2.2.1. Fibra de vidrio
 - 10.2.2.2. Fibra de carbono
 - 10.2.2.3. Fibras orgánicas
 - 10.2.2.4. Fibras naturales
- ♦ 10.2.3. La interfase

10.3. Un poco de historia

- ♦ 10.3.1. Materiales compuestos de origen natural
- ♦ 10.3.2. Cementos y hormigones
- ♦ 10.3.3. El alquitrán
- ♦ 10.3.4. Resumen

10.4. Clasificación de los materiales compuestos

10.5. ¿Por qué necesitamos materiales compuestos?

- ♦ 10.5.1. Filosofía de diseño
 - Longitud y diámetro de las fibras
 - Cantidad de fibras
 - Orientación de las fibras

10.6. Propiedades de los materiales compuestos

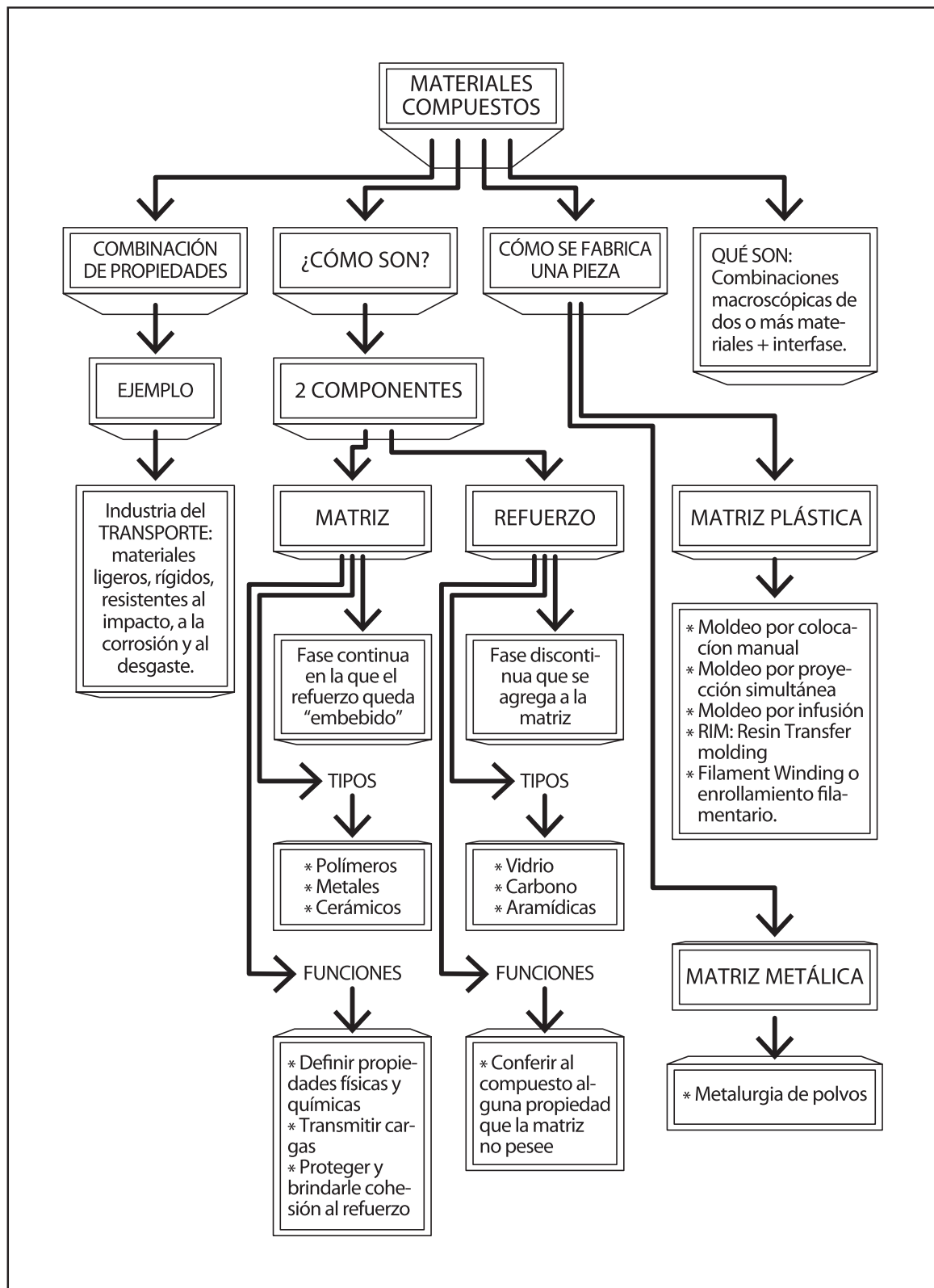
- ♦ 10.6.1. Propiedades mecánicas (propiedades específicas)
- ♦ 10.6.2. Resistencia a la corrosión

10.7. Métodos de fabricación

- ♦ 10.7.1. Compuestos de matriz plástica
- ♦ 10.7.2. Compuestos de matriz metálica

Bibliográficas y webgrafía

Red conceptual



10.1. ¿Qué son los materiales compuestos?

Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interfase discreta y reconocible que los separa. Debido a ello, son heterogéneos (sus propiedades no son las mismas en todo su volumen). Si bien algunos materiales compuestos son naturales (como la madera o el hueso), la gran mayoría de los materiales compuestos utilizados en la actualidad son diseñados y “fabricados” por el hombre.

Los materiales de esta familia surgen de la necesidad de obtener materiales con una combinación de propiedades que difícilmente se encuentren en los cerámicos, los plásticos o los metales. Por ejemplo, en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades éstas que rara vez se dan juntas; por lo que se “diseña” un material según la aplicación para la cual se necesitan.

A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, utilizar estos materiales en aplicaciones prácticas no siempre es factible dado que se trata, en general, de materiales caros, de difícil fabricación.

Una característica de todos los materiales compuestos es que, en cada uno de ellos, se pueden distinguir dos componentes bien diferenciados: la *matriz* y el *refuerzo* o *fase discontinua*.

10.2. ¿Cuáles son los componentes de los materiales compuestos?

Para comprender qué son los materiales compuestos y por qué los necesitamos, debemos estudiar qué características poseen y cómo se relacionan la *matriz* y el *refuerzo*.

10.2.1. La matriz

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda “embebido”. Tanto materiales metálicos, cerámicos o resinas orgánicas pueden cumplir con este papel. A excepción de los cerámicos, el material que se elige como matriz no es, en general, tan rígido ni tan resistente como el material de refuerzo.

Las *funciones principales* de la *matriz* son:

- definir las propiedades físicas y químicas;
- transmitir las cargas al refuerzo,

- protegerlo y brindarle cohesión.

Así como también permitirá determinar algunas características del material compuesto como la conformabilidad y el acabado superficial, es decir, de las propiedades de la matriz dependerá la capacidad que posea el material compuesto para ser conformado con geometrías complejas en procesos que, generalmente, no involucrarán posteriores etapas de acabado.

Al someter al material compuesto a diferentes tipos de cargas mecánicas la matriz juega diferentes roles:

1. Bajo cargas compresivas: es la matriz la que soporta el esfuerzo, ya que se trata de la fase continua.



2. En tracción: la matriz transfiere la carga aplicada sobre la pieza a cada una de las fibras o partículas, de manera que éstas sean las que soporten el esfuerzo. Para ello es necesaria una excelente adhesión entre la matriz y el refuerzo.

Además, muchas veces es la matriz la que determina la resistencia al impacto y la encargada de detener la propagación de fisuras.

10.2.1.1. Propiedades de las matrices

La matriz de un material compuesto:

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

Las matrices poliméricas son las más comúnmente utilizadas. La mayoría de los polímeros, tanto termoplásticos como termoestables están disponibles en el mercado con el agregado de fibras de vidrio cortas como refuerzo.

Los compuestos de matriz metálica incluyen aluminio, magnesio, cobre, níquel y aleaciones de compuestos intermetálicos reforzados con fibras cerámicas y metálicas. Mediante los compuestos de matriz metálica se cubre una diversidad de aplicaciones aeroespaciales y automotrices. La matriz metálica permite que el compuesto funcione a altas temperaturas pero, a menudo, la producción de una pieza de este tipo de materiales compuestos es más costosa que la de una pieza de compuestos de matriz polimérica.

En los materiales compuestos, también, pueden utilizarse como matriz materiales cerámicos frágiles. Los compuestos de matriz cerámica tienen buenas propiedades a temperaturas elevadas (hasta algunos miles de grados centígrados) y son más livianos que los de matriz metálica a igual temperatura.

10.2.2. El material de refuerzo

Es la fase discontinua (o dispersa) que se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas pero, también, se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión.

El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras. Como regla general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra.

Si bien, como veremos más adelante, los materiales de refuerzo pueden presentarse en forma de partículas en un amplio grupo de materiales compuestos, los más numerosos y ampliamente utilizados son aquellos reforzados con fibras.

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

$$\text{Resistencia específica} = \frac{\sigma_y}{\rho}$$

$$\text{Módulo específico} = \frac{E}{\rho}$$

donde σ_y es el esfuerzo de cedencia, ρ la densidad y E el módulo de elasticidad.

Las fibras más utilizadas son las de *vidrio*, *carbón* y *aramida*. Estos tres materiales poseen una resistencia a la tracción extremadamente alta. Sin embargo, esto no parece muy evidente cuando los pensamos como sólidos macizos.

10.2.2.1. Fibra de vidrio

El *vidrio*... a nadie se le ocurriría decir que es más resistente que el acero u otro metal. Ni siquiera que es más resistente que los polímeros que utilizamos de manera corriente. Una varilla de vidrio diríamos que es, sin temor a equivocarnos, mucho menos resistente que un revolvedor de plástico, o que una cucharita de metal ¿no es cierto?

Entonces... ¿por qué utilizamos fibras de VIDRIO para reforzar materiales compuestos?

Cuando sometemos a estos materiales “frágiles” a tensiones, los defectos presentes al azar en el sólido, provocan la ruptura del mismo a esfuerzos mucho menores que su resistencia teórica. Para solucionar este problema, estos materiales son producidos en forma de fibras de manera tal que, si bien existen esos mismos defectos orientados al azar, estos se observarán en algunas de las miles de fibras, mientras que el resto podrá dar cuenta de la resistencia esperada del material sin defectos. Sin embargo, las fibras sólo pueden exhibir esta alta capa-

cidad de resistir esfuerzos en la dirección de las mismas, como ocurre con los filamentos que forman una soga. Luego, las propiedades mecánicas son generalmente anisotrópicas y varían mucho según el grado de ordenamiento de las fibras en el interior del material: ordenadas uniaxialmente, parcialmente ordenadas y desordenadas.

Son las fibras más comúnmente utilizadas, en principio porque su costo es menor a las de carbono o aramídicas. Las matrices más comunes son las resinas de poliéster. Tienen una densidad y propiedades a la tracción comparable a las fibras de carbono y aramida pero menor resistencia y módulo de tensión, aunque pueden sufrir mayor elongación sin romperse.

Las aplicaciones más comunes son:

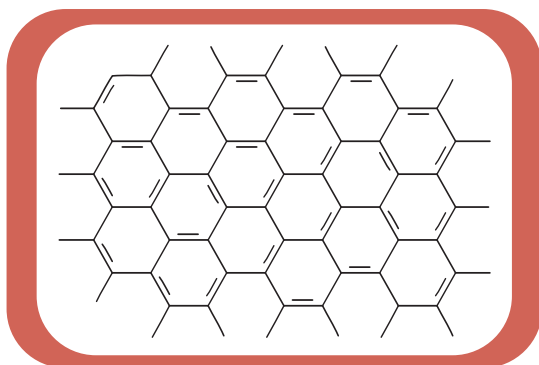
- carrocerías de automóviles y barcos,
- recipientes de almacenaje,
- principalmente la industria del transporte en general.

Recientemente ha aparecido un material de matriz de nailon reforzado con fibra de vidrio que es extraordinariamente fuerte y con gran resistencia al impacto.

10.2.2.2. Fibra de carbono

La estructura atómica de la fibra de carbono es similar a la del grafito, consiste en láminas de átomos de carbono arreglados en un patrón regular hexagonal. El grafito es el material de las minas de lápiz negro. De la misma manera que cuando pensamos en la fibra de vidrio, no se nos ocurriría pensar que la mina de lápiz es un material súper resistente ¿no es cierto?

Entonces... ¿por qué las fibras de carbono, con una estructura tan parecida, sí lo son?



Estructura hexagonal de los átomos de carbono en el grafito.

La diferencia recae en la manera en que las láminas hexagonales que forman el grafito se inter cruzan. El grafito es un material cristalino en donde las hojas se sitúan paralelamente unas a otras regularmente. Cuando uno escribe, mayormente lo que pasa es que las hojas se deslizan fácilmente unas sobre otras, transfiriéndose al papel. Las uniones químicas entre las hojas son relativamente débiles, dándoles al grafito su blandura y brillo característicos. La fibra de carbono es una forma de grafito en la cual estas láminas son largas y delgadas. Los manojos de estas cintas se empaquetan entre sí para formar fibras, de ahí el nombre *fibra* de carbono. La fibra de carbono es un material amorfo: las cintas de átomos de carbono están azarosamente empaquetadas o apretadas, juntas. Esto hace que ante una tensión de tracción, las hojas se “traben” unas con otras, previniendo su corrimiento entre capas e incrementando, grandemente, su resistencia.

Las fibras de carbono fueron utilizadas por primera vez por Edison en el siglo XIX como filamentos para bombillas. Él las obtuvo por calentamiento en condiciones especiales de fibras vegetales.

La fibra de carbono que utilizamos en la actualidad como refuerzo de materiales compuestos se fabrica a partir de un polímero llamado poliacrilonitrilo (PAN), a través de un complicado proceso de calentamiento.

Los filamentos de fibra de carbono tienen un diámetro que oscila entre 5 y 8 mm y están combinados en mechas que contienen entre 5000 y 12000 filamentos. Estas mechas pueden retorcerse en hilos y formar tejidos.

Las fibras de carbono tienen alta resistencia mecánica y alta rigidez, pero son poco resistentes al roce y al impacto de baja energía.

Es muy utilizada en la industria aeronáutica para disminuir el peso de los aviones. Su elevado precio limita las aplicaciones en la industria del automóvil.

10.2.2.3. Fibras orgánicas

La **aramida** es un filamento orgánico que proviene de ciertos derivados del petróleo. Su nombre se deriva de las funciones orgánicas que poseen: aromático y **amida**. Se utilizan en estructuras compuestas, como en las fibras de Kevlar.

El KEVLAR es un polímero totalmente aromático, infusible que, químicamente es muy similar al nylon T. Sólo se fabrica como fibra (mediante fricción en solución), tiene una estabilidad y resistencia térmica y a las llamas muy altas. Sus propiedades de tracción son superiores a las de las fibras textiles normales debido a un alto grado de orientación molecular resultante de sus moléculas lineales rígidas y de su propensión a formar cristales líquidos durante la fricción en solución.

Se utilizan, ampliamente, en los composites más ligeros que aislantes eléctricos que se basan en fibra de carbono. Sus propiedades mecánicas suelen ser inferiores. Su coeficiente específico de tracción es alto y cercano al de los composites de fibra de carbono pero su resistencia a la compresión es bastante débil.

Además de los composites, sus aplicaciones incluyen ropa de protección, chalecos antibalas, productos de fricción, reforzamiento de elastómeros (p.ej. tubos y cintas de transportadores de cinta), cables, cuerdas y telas de las velas de barcos.

El desarrollo importante de las fibras de aramida tiene lugar en los años sesenta y a principios de los setenta.

Las fibras de aramida tienen una alta resistencia al impacto y la corrosión y son extremadamente resistentes al ataque químico, exceptuando ácidos fuertes y bases a altas concentraciones. **Las fibras de aramida están disponibles a través de 3 fabricantes con los siguientes nombres comerciales: Twaron, Kevlar y Technora. La fibra de Kevlar fue la primera en ser introducida al mercado por Du Pont en el año 1972.**

La aramida se degrada a 480°C en nitrógeno y a alrededor de los 380°C en aire.

Se utilizan en cables, sistemas balísticos y de armamento.

10.2.2.4. Fibras naturales

Actualmente, cada vez se utilizan más materiales reforzados con fibras que sean más económicas y de menor impacto medioambiental. **Para ello, se están reforzando muchos polímeros**

con fibras provenientes de productos naturales como el lino o la fibra de coco; utilizándose más en la industria del automóvil donde según una directriz de la UE para el 2015 el 95 % de la masa de un coche debe ser reutilizable. Además, si las fibras de refuerzo provienen de vegetales, el impacto medioambiental total en la fabricación de las piezas es mucho menor. Se está dedicando mucho esfuerzo de investigación en la fabricación de materiales compuestos completamente “ecológicos” o “verdes”. En ellos se refuerza la matriz del polímero natural (p. ej. celulosa) con fibras de origen vegetal (p. ej. fibra de lino). Ya existen polímeros comerciales completamente “verdes” y se prevé que su producción aumente en el futuro (aunque, actualmente, los precios son mayores que los análogos obtenidos del petróleo).

10.2.3. La interfase

Además de las características de las fibras y de la matriz, las propiedades de los materiales compuestos dependerán de cómo sea la interfase (la región de contacto) entre estos dos componentes. Si la interfase es débil, la transferencia de carga de la matriz a la fibra no será eficiente y/o bien será la matriz la que termine soportando las cargas (y fallando, puesto que no es muy resistente), o se producirán huecos entre la matriz y las fibras, lo cual llevará a la rotura de la pieza. Lograr una buena adhesión entre la fibra y la matriz no es tarea fácil, ya que en general se trata de materiales de familias diferentes (polímero - vidrio, metal - cerámico) y la buena adhesión depende del contacto íntimo de los átomos en la superficie de uno y otro componente. Es por eso que existe toda un área de desarrollo de aditivos con los cuales recubrir a las fibras para que resulten más compatibles con la matriz, y aumenten la adhesión entre los componentes del material compuesto.

Microfotografía obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie de fractura de una aleación plata-cobre, reforzada con fibras de carbono. Una mala unión hace que gran parte de la superficie de la fractura siga la interfase entre la matriz de metal y las fibras de grafito (x3000). (*De Metals Handbook, American Society for Metals, Vol. 9, 9a. Ed., 1985.*)



10.3. Un poco de historia

10.3.1. Materiales compuestos de origen natural

Los ingenieros pueden diseñar los materiales compuestos de acuerdo a cuáles sean las condiciones en las que deben trabajar las piezas o estructuras que necesitan fabricar.

Sin embargo, los primeros materiales compuestos utilizados por el hombre son de origen natural: LAS MADERAS. Aunque hay maderas muy diferentes y con propiedades mecánicas y de

conducción de fluidos muy variadas tienen en común una *matriz* celulósica *reforzada con fibras* de lignina (y otros compuestos orgánicos) que le dan las buenas propiedades de elasticidad y deformación sin ruptura.

10.3.2. Cementos y hormigones

Hay varios tipos de materiales compuestos para la construcción y, desde el tiempo de los egipcios, se utilizaba el **adobe** (que consiste en una mezcla de *fibra* de paja en una *matriz* de arcilla con agua) para dar una pasta moldeable de la que se hacían ladrillos con la forma deseada, y se ha utilizado como cemento en construcciones.

Actualmente, el **hormigón** es el material más importante y más usado como componente estructural en la construcción. Tiene la ventaja de la flexibilidad de diseño puesto que, en su estado pastoso inicial, se puede verter y adquiere la forma que lo contiene, es muy barato, posee alta dureza, resistencia al fuego y puede ser fabricado en el lugar. Los inconvenientes son su escasa resistencia a la tracción, baja ductilidad y sufre problemas de dilatación/contracción con las variaciones de temperatura.

El hormigón es un material compuesto formado por partículas dispersas (grava y arena) de gran tamaño (0.5 – 20 mm) generalmente SiO₂ (dióxido de silicio o sílice) en una matriz dura de silicatos y aluminatos (aglutinantes) que provienen de la hidratación del **cemento**.

O sea que, tanto la matriz como el refuerzo, son de la familia de los cerámicos. La pasta moldeable original se forma por la agitación física de las cantidades adecuadas de cemento Portland (7-15 %), agua (14-21 %), agregado fino (arena 24-30 %) y agregado tosco (grava 31-51 %).

La pasta del cemento actúa en el hormigón como aglutinante y mantiene unidas las partículas. El cemento Portland (que debe su nombre a una pequeña península en la costa sur de Inglaterra) puede tener composiciones variables. Las materias primas básicas son:

- 1) caliza CaO,
- 2) arena (sílice, SiO₂);
- 3) alúmina (Al₂O₃);
- 4) óxido de hierro (Fe₂O₃)

El hormigón es un material compuesto formado por cerámicos y tiene una resistencia a la compresión mucho mayor que a la tracción (un orden de magnitud). La mejora de las propiedades de resistencia a la tracción se puede llevar a cabo mediante el refuerzo con barras de acero (que pueden estar pretensadas). Si las barras están tensadas en el momento del fraguado el hormigón aumenta más la resistencia. El hormigón reforzado con acero se conoce como hormigón armado y constituye la etapa de encofrado de un edificio para construir la estructura básica de pilares.

10.3.3. El alquitrán

El **alquitrán** (o bitumen) es un polímero termoplástico que se obtiene a partir de la destilación fraccionada del petróleo (última fracción). Sirve por su efecto adhesivo para pavimentación de carreteras. El **asfalto** es un material compuesto con agregado y aglutinante. El agregado suele ser arena (y grava fina); el aglutinante suele ser alquitrán. Se están utilizando productos del reciclado del vidrio como agregado.

10.3.4. Resumen

Los polímeros reforzados son fibras de algún tipo, embebidas en una matriz de resina. Las fibras más comunes son las de vidrio, aramídicas (Kevlar) y carbono. Las resinas más comunes son las poliéster, vinil ester y epoxi.

Las propiedades ingenieriles de los compuestos derivan, principalmente, de las propiedades físicas y mecánicas de la fase discontinua que son las fibras de refuerzo. Al aumentar la fracción en volumen de fibra aumentan las propiedades mecánicas hasta el punto en que la cantidad de matriz es insuficiente para soportar las fibras y transferir la carga al material compuesto.

Las fibras pueden estar distribuidas dentro de la matriz al azar o siguiendo ciertas direcciones respecto de la geometría de la pieza (longitudinales, transversales). Debido a la variedad en resistencia mecánica y tenacidad es posible para un ingeniero escoger qué valores de tales propiedades son requeridos por cada aplicación, así como en qué dirección son requeridas estas propiedades.

10.4. Clasificación de los materiales compuestos

10.4.1. Existe una clasificación de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz:

Compuestos de matriz polimérica: son los más comunes. También se los conoce como polímeros (o plásticos) reforzados con fibras. La matriz es un polímero y una variedad de fibras, tales como las de vidrio, las de carbono o las aramídicas, se utilizan como refuerzo.

Compuestos de matriz metálica: se utilizan cada vez más en la industria automotriz. Estos materiales están formados por metales “livianos” como el aluminio como matriz y fibras de refuerzo como las de carburo de silicio.

Compuestos de matriz cerámica: se utilizan en aplicaciones de alta temperatura. Estos materiales están formados por una matriz cerámica y un refuerzo de fibras cortas, o whiskers de carburo de silicio o nitruro de boro.

10.4.2. De acuerdo a la forma que posea el refuerzo, es posible clasificar a los materiales compuestos de la siguiente manera:

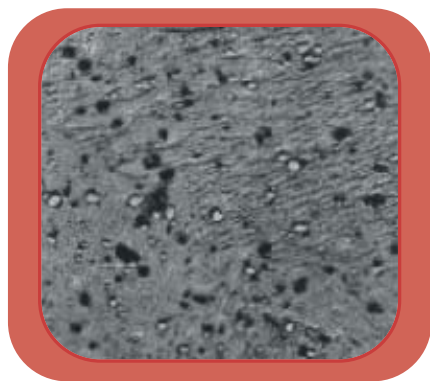
■ **Materiales compuestos reforzados con partículas.** A su vez estos materiales se clasifican en **materiales reforzados con partículas grandes** y otros **consolidados por dispersión**.

Los compuestos **consolidados por dispersión** son aquellos en los cuales las partículas poseen de 10 a 250 nm de diámetro. Las partículas dispersas, por lo general, óxidos metálicos, se introducen en la matriz con métodos distintos a las transformaciones de fases empleadas en el desarrollo de aleaciones.

A temperatura ambiente, los compuestos endurecidos por dispersión pueden ser menos resistentes que las aleaciones tradicionales. Sin embargo, la resistencia de estos materiales compuestos decrece en menor medida al incrementarse la temperatura, dado que no ocurren los fenómenos típicos que reducen la resistencia mecánica de las aleaciones.

Es importante que el dispersante tenga baja solubilidad en la matriz y no reaccione químicamente con ella, aunque un pequeño grado de solubilidad puede ayudar a mejorar la unión entre los componentes. El óxido de cobre (Cu_2O), por ejemplo, se disuelve en el cobre a altas temperaturas, por lo que el sistema Cu_2O -Cu no sería eficaz; sin embargo, el óxido de aluminio (Al_2O_3) no se disuelve en el aluminio, así es que el sistema Al_2O_3 -Al proporciona materiales efectivos endurecidos por dispersión.

Algunos ejemplos de aplicación de materiales compuestos endurecidos por dispersión son: contactos eléctricos, componentes de turborreactores, rejillas para baterías, filamentos de calentadores, hasta incluso en la industria aeroespacial y en reactores nucleares.

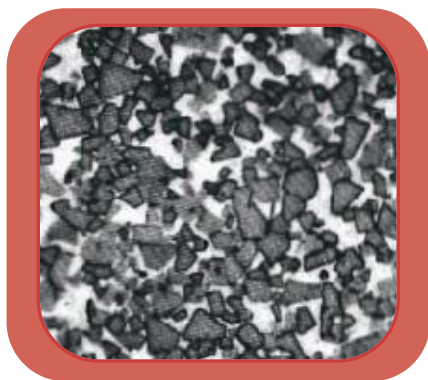


Micrografía electrónica del níquelTD. Las partículas dispersas de ThO_2 tienen un diámetro de 300 nm o menos (x2000). (*De Oxide Dispersion Strengthening, p.714, Gordon and Breach, 1968, © AIME.*)

En los **compuestos particulados verdaderos**, el término “grande” se utiliza para indicar las interacciones entre la matriz y las partículas a un nivel macroscópico. Estos materiales están diseñados para producir combinación de propiedades poco usuales, y no para mejorar la resistencia mecánica.

El material compuesto reforzado con partículas grandes más común es el **hormigón**. Las partículas son la arena o grava en una matriz cerámica compuesta por silicatos y aluminatos hidratados. Algunos materiales poliméricos a los que se les ha añadido un aditivo de relleno se

comportan como materiales compuestos reforzados con partículas grandes. Las partículas pueden tener una gran variedad de geometría pero suelen tener aproximadamente las mismas dimensiones en todas las direcciones (equiaxiales), lo cual es la gran diferencia con las fibras. El reforzamiento es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz. Las propiedades mecánicas mejoran con el contenido de partículas o, lo que es lo mismo, con el incremento de la relación partículas/matriz. Todos los materiales (metales, polímeros y cerámicas) se utilizan para fabricar este tipo de materiales. Los compuestos metal-cerámica son conocidos como **cermets** (*ceramic metal*) o **carburos cementados**. El carburo cementado más común es un carburo cementado, por ejemplo WC o TiC embebidos en una matriz metálica de cobalto o níquel. Tienen gran aplicación en materiales para herramientas de corte en acero endurecidos con carburos precipitados (cementados). Estas partículas, extremadamente duras, aportan el efecto de cortante a la superficie pero, son frágiles por lo que estos carburos por sí mismos no pueden soportar los grandes esfuerzos mecánicos en el corte. También se emplean cermets como ánodos en pilas de combustible.



Micrografía electrónica del níquelTD. Las partículas dispersas de ThO_2 tienen un diámetro de 300 nm o menos (x2000). (De Oxide Dispersion Strengthening, p.714, Gordon and Breach, 1968, © AIME.).

En el caso de los polímeros son comunes los materiales reforzados con negro de humo que son micropartículas (con diámetros entre 20 y 500 nm), esencialmente, esféricas de carbono producidas por la combustión incompleta del gas natural u otros derivados del petróleo. La adición de este material (muy económico) al caucho vulcanizado, aumenta la tenacidad y las resistencias a la tracción, torsión y desgaste, además de mejorar la resistencia al calor.

En algunos polímeros se utilizan extensores como carbonato de calcio, esferas sólidas de vidrio y diversas arcillas, a fin de lograr que se requiera una menor cantidad de polímero y se reduzca el costo. Los extensores pueden hacer más rígido al polímero, incrementando su dureza, su resistencia al desgaste, su conductividad térmica y mejorando su resistencia a la termofluencia; sin embargo, normalmente, reducen la tenacidad y la ductilidad.

Los neumáticos de los vehículos contienen entre un 15 al 30% en volumen de negro de humo.

Otros ejemplos son las partículas de elastómero introducidas en algunos polímeros para mejorar la tenacidad, o las partículas de polvo de plomo para aplicaciones nucleares.

■ **Materiales compuestos reforzados con fibras.** La mayoría de los compuestos reforzados con fibra consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resisten-

cia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas, aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La resistencia del compuesto puede resultar alta a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas.

Se emplean muchos tipos de materiales de refuerzo. En las estructuras de concreto se introducen varillas de acero de refuerzo. Las fibras de vidrio en una matriz polimérica producen un material para aplicaciones en el transporte y la industria aeroespacial.

10.5. ¿Por qué necesitamos materiales compuestos?

Las resinas tales como epoxies y Poliésteres como materiales poliméricos tienen un uso limitado para la manufactura de elementos estructurales por sí mismas, dado que sus propiedades mecánicas no son muy altas comparadas con, por ejemplo, la mayoría de los metales. Sin embargo, poseen algunas características importantes, como su excelente capacidad de ser fácilmente conformadas en piezas geométricamente muy complejas.

Por otro lado, materiales tales como el vidrio, las aramidas y el boro tienen una resistencia mecánica extremadamente alta. Sin embargo, esta característica no es aparente cuando consideramos al material como un sólido macizo. Esto se debe a que cuando sometemos a estos materiales a tensiones, defectos presentes al azar en el sólido, provocan la ruptura del mismo a esfuerzos mucho menores que su resistencia teórica.

Sucede que cuando combinamos las resinas con las fibras de refuerzo, se obtienen sólo entonces, propiedades excepcionales. La matriz de resina distribuye la carga aplicada al material compuesto entre cada fibra individual, al tiempo que protege a las fibras del daño causado por abrasión o impacto. Entonces, mediante esta configuración de dos tipos de materiales tan diferentes entre sí, en una manera en la que trabajan dando sus mejores características cada uno, logramos alta resistencia mecánica y tenacidad, facilidad para la conformación de piezas complejas, alta resistencia a la corrosión, todo acompañado con baja densidad. Esto hace que muchas veces los materiales compuestos resulten superiores a los metálicos en diferentes aplicaciones.

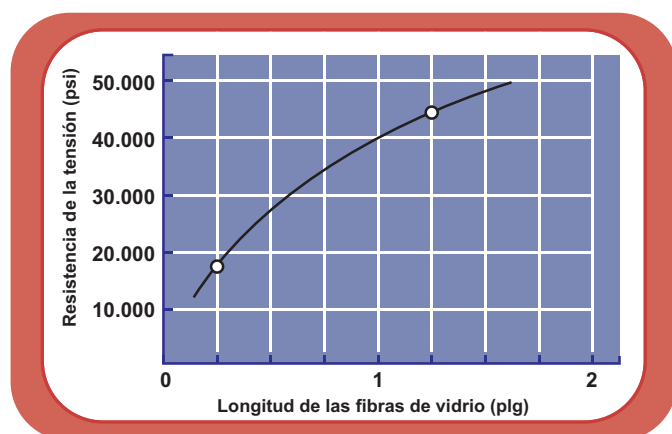
10.5.1. Filosofía de diseño

Imaginemos por un momento que los compuestos no existen y consideremos qué características necesitamos para un material que va a ser parte de un producto determinado, el cual tiene que trabajar en un ambiente agresivo tal como agua de mar, por ejemplo. Este material que necesitamos debe ser fácil de conformar, debe ser capaz de permanecer en aguas saladas frías o cálidas, e idealmente debe requerir de poca tecnología para pasar de la materia prima al producto final. También nos serviría que dicho material sea liviano, relativamente poco costoso y que pueda ser hecho a la medida en cuanto a su resistencia y su rigidez.

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

Longitud y diámetro de las fibras. Las fibras pueden ser cortas, largas o incluso continuas. A menudo se caracterizan sus dimensiones mediante la *relación de forma*: l/d , donde l es la longitud de las fibras y d su diámetro. Las fibras típicas tienen diámetros que varían desde 10 micrones hasta 150 micrones.

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



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

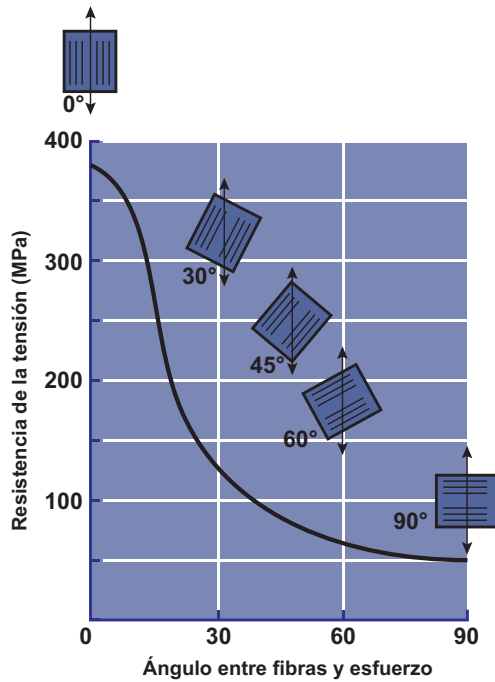
Cantidad de fibras. Una fracción mayor de volumen de fibras incrementa la resistencia y la rigidez del compuesto, por ser el que posee mayores propiedades mecánicas intrínsecas. Sin embargo, la fracción máxima de volumen de fibras es, aproximadamente, 80 por ciento; más allá de esta cantidad, las fibras ya no quedan totalmente rodeadas por la matriz y la transferencia de carga deja de ser eficiente.

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

Los arreglos unidireccionales con fibras largas e incluso continuas producen propiedades anisotrópicas, con resistencia y rigidez paralelas a las fibras, particularmente, buenas. Estas fibras se denominan, frecuentemente, como capas de 0° , indicando que todas las fibras están alineadas en la dirección del esfuerzo aplicado; lo cual ocurre en los productos fabricados por pultrusión. Sin embargo, si la carga es perpendicular a las fibras, la orientación unidireccional origina propiedades pobres.

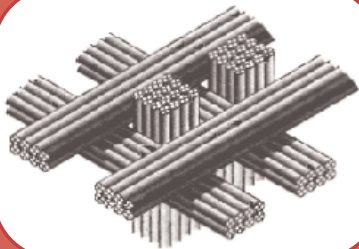
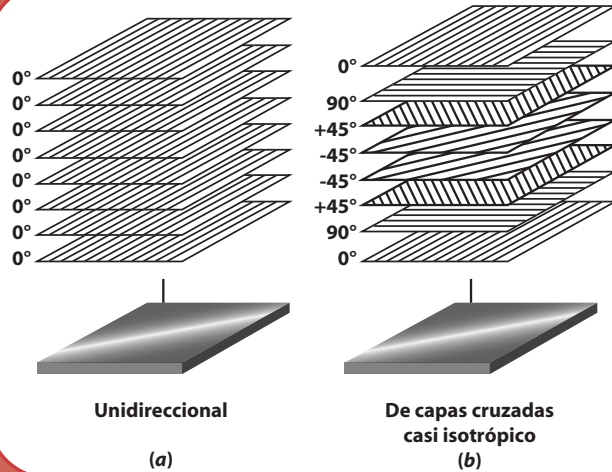
Una de las características únicas de los compuestos reforzados con fibra es que sus propiedades se pueden diseñar para soportar condiciones de carga diferentes. En la matriz se pueden introducir fibras largas y continuas en varias direcciones, mediante arreglos ortogonales (capas de $0^\circ/90^\circ$) se obtienen buenas resistencias en dos direcciones perpendiculares. Disposiciones más complejas (como capas de $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) proporcionan refuerzo en varias direcciones.

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



Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E.

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



Tejido tridimensional para compuestos reforzados con fibra.

10.6. Propiedades de los materiales compuestos

10.6.1. Propiedades mecánicas (propiedades específicas)

Dado que los materiales compuestos combinan resinas con fibras de refuerzo, las propiedades del material resultante combinarán de alguna manera las propiedades de cada uno de estos dos componentes.

Las propiedades del material compuesto estarán determinadas por:

- Las propiedades de la fibra
- Las propiedades de la matriz
- La relación entre la cantidad de fibra y de resina en el material (la fracción en volumen de fibra)
- La geometría y orientación de las fibras en el compuesto

La mayoría de los materiales compuestos poseen una alta resistencia mecánica al mismo tiempo que una baja densidad, lo cual permite realizar estructuras y dispositivos resistentes y a la vez livianos. A la relación entre la resistencia mecánica y la densidad se la denomina resistencia específica. Como se observa en las figuras de la página anterior, los cerámicos y los metales aventajan a los compuestos en mayor resistencia, mientras que los polímeros poseen en general la menor densidad, pero al evaluar ambas propiedades juntas, los materiales compuestos son la opción más conveniente. Esto se debe a que al utilizar una matriz polimérica logramos una baja densidad; mientras que las fibras aportan la resistencia mecánica, pero como son la fase minoritaria no agregan demasiado peso al material.

10.6.2. Resistencia a la corrosión

En otras aplicaciones, los materiales compuestos son preferidos en lugar de los metales; no por permitir el diseño de estructuras más livianas, sino porque nos permiten obtener materiales con mejor resistencia a los medios corrosivos. Los metales son susceptibles a la corrosión en muchos medios agresivos, como los relacionados con la industria del petróleo. En cambio, los polímeros y los cerámicos son, en general, más resistentes, cuando no totalmente inertes en dichos medios. Entonces, si logramos un material compuesto (una resina con fibras de vidrio, por ejemplo) con la resistencia mecánica y tenacidad adecuadas para aplicaciones como tuberías para la industria petrolera, esta opción poseerá, además, la capacidad de resistir mejor las condiciones de servicio.

10.7. Métodos de fabricación

En la conformación de un material compuesto hay muchas opciones diferentes al momento de elegir materiales entre resinas y fibras, cada una de ellas con su conjunto de propiedades

únicas tales como resistencia, rigidez, tenacidad, resistencia térmica, corto, productividad, etc. Sin embargo, las propiedades finales de una pieza de material compuesto producida a partir de estos distintos materiales no dependen sólo de las propiedades individuales de la resina matriz y de las fibras sino, también, del modo mediante el cual se diseñan y procesan dichos materiales.

Las técnicas empleadas en la fabricación de materiales compuestos con matrices plásticas poseen algunos años de madurez, mientras que aquellas mediante las cuales se procesan matrices metálicas o cerámicas están aún en vías de desarrollo.

10.7.1. Compuestos de matriz plástica

Cuando las resinas utilizadas en la fabricación de un material compuesto son polímeros termoplásticos, las técnicas empleadas para su procesamiento son, principalmente, aquellas mediante las cuales se procesa la matriz individualmente para llegar a una pieza final: inyección, extrusión, moldeo por compresión.

En cambio, los procesos desarrollados para producir compuestos mediante el empleo de matrices termorrígidas, han sido diseñados especialmente.

■ *Hand lay up o Moldeo por colocación manual y Spray lay up o Moldeo por proyección simultánea*

El **moldeo por colocación manual**, o moldeo por contacto, es denominado así debido a las bajas o nulas presiones que necesita y fue la primera técnica que se empleó en el laminado de los plásticos reforzados con fibra de vidrio, siendo todavía uno de los procesos más utilizados.

En producciones en series industriales cortas o de piezas de gran superficie es el método más económico al presentar las ventajas de su relativa sencillez y no requerir mano de obra, excesivamente, especializada ni inversiones elevadas.

Aún así, presenta los inconvenientes de un ambiente de trabajo molesto, producción lenta, mayor necesidad de mano de obra, acabado fino sólo por una de las caras, y calidad final sometida a la especialización y sensibilidad del operario.

Por otro lado, las características mecánicas y físicas alcanzadas son inferiores a las obtenidas mediante otros procesos, debido sobre todo a la limitación del porcentaje de fibra de vidrio de los laminados.

Las aplicaciones de este método son: palas de aerogeneradores, barcos y maquetas de construcción.

El **moldeo por proyección simultánea** supone una primera evolución del moldeo por contacto, al automatizar alguna de las operaciones con objeto de ganar productividad y reducir costos de fabricación.

Las materias primas empleadas son rigurosamente las mismas, excepto por la presentación del refuerzo, aunque sus características físicas varían, ligeramente, para una mejor adaptación al proceso: fibras continuas y resinas menos viscosas.

La realización del proceso consiste en depositar sobre el molde de forma simultánea fibra y resina en las proporciones adecuadas y de manera que las cantidades depositadas originen sobre el molde un tapiz lo más homogéneo posible en cuanto a espesor y distribución.

Las ventajas principales de este proceso son su madurez como técnica luego de muchos años de implementación, bajo costo de producción y de herramental.

Por otro lado, las desventajas son el bajo porcentaje de fibra admisible, que por tratarse de fibras cortas no permiten obtener piezas con altas propiedades mecánicas y que los espesores que se pueden conseguir están limitados a partir de algunos milímetros.

Las aplicaciones de este proceso son: cerramientos simples y/o paneles estructurales sometidos a cargas ligeras.

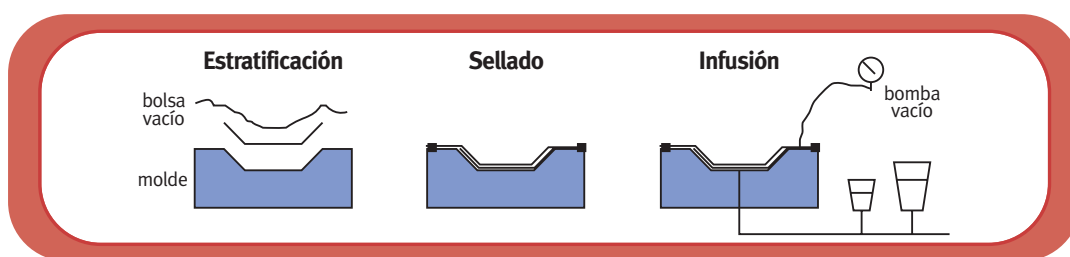
■ **Moldeo por infusión (haga un barquito con bolsas del supermercado...)**

Esta es una extensión del hand lay-up en donde el laminado es consolidado con la ayuda de una bomba de vacío y una bolsa hermética. En este proceso se coloca el laminado sobre el molde. Por sobre el laminado se aplican capas de mantas perforadas (de sangrado) que sirven para retener el exceso de resina que sale del laminado. Por sobre el conjunto se coloca una bolsa herméticamente sellada. Acto seguido se realiza vacío entre el molde y la bolsa para extraer las burbujas de aire y retirar el exceso de resina (consolidado). El curado se realiza generalmente en vacío.

Para este proceso se pueden emplear tanto resinas epoxi y fenólicas, como resinas poliéster; mientras que las fibras a utilizarse pueden presentarse en una gran variedad de mantas. Se pueden lograr mayores concentraciones de fibras en el laminado que con el laminado por contacto manual; con menores concentraciones de burbujas, mejor humectación de las fibras por la presión y el flujo de resina a través de la estructura de las fibras hasta alcanzar los materiales de la bolsa.

Es un proceso saludable y seguro, ya que el vacío asegura un bajo contacto del operario con las emisiones de las resinas durante el curado. Pero, el proceso agrega costos extras tanto en horas de trabajo como en materiales (bolsa y bomba de vacío) y el operador necesita tener un alto nivel de entrenamiento, ya que el mezclado y control del contenido de resina es dependiente de su habilidad.

Típicamente se aplica este proceso para la fabricación de botes de altas prestaciones, componentes de coches de carreras y múltiples componentes en la industria automotriz (automóviles de lujo).



■ **RTM: Resin transfer molding (Autopartes en un abrir y cerrar de moldes...)**

En este proceso un molde es relleno con el material de refuerzo. Una pre-presión es aplicada sobre el refuerzo para que éste tome correctamente la forma del molde y, luego, es mantenido sujeto por medio de amarras. Esta preforma es entonces cerrada por la contraparte del molde y la resina es inyectada dentro de la cavidad. Puede ser aplicado vacío al conjunto para asistir al flujo de la resina dentro de la cavidad y a la eliminación de aire atrapado. Una vez que toda la preforma es humedecida por la resina se cierra el molde a la salida de resina sobrante y comienza el curado. Durante la etapa de inyección de resina el frente de avance de la misma va eliminando el aire del refuerzo. Este proceso se diferencia de los de moldeo por presión en que la resina es introducida en el molde cuando éste se encuentra cerrado.

Por medio de este proceso se pueden obtener formas complejas de manera eficiente, en cortos tiempos y económicos con alta fracción de fibras y baja concentración de burbujas; siendo una técnica segura y limpia para el operador. Ambas caras del material tienen buena terminación superficial y es viable agregar molde fácilmente inserto y fibras especiales.

En contrapartida, el diseño del molde es crítico y requiere gran pericia; las propiedades son equivalentes a las de las piezas fabricadas por moldeos a presión pero no son tan buenas como otros materiales compuestos realizados por técnicas como enrollamiento filamentario o moldeo de pre-impregnados; el control de la uniformidad de la resina puede ser dificultoso especialmente en zonas con radios marcados, como también puede ocurrir desplazamiento del refuerzo.

Es un proceso típicamente aplicado para la obtención de pequeñas a medianas y complejas partes de aviones y automóviles, asientos de trenes, puertas de cabinas y de colectivos.

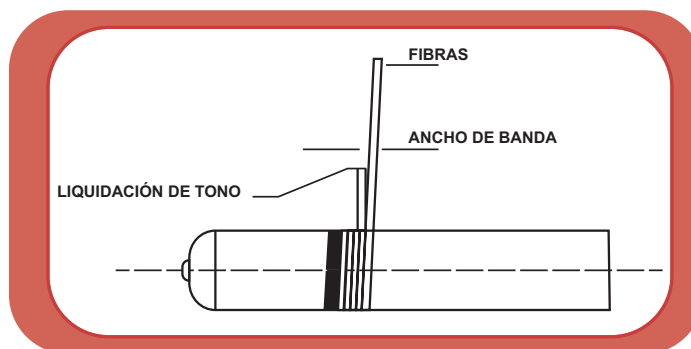
■ **Filament Winding ó enrollamiento filamentario**

La base del proceso de filament winding es el enrollamiento sobre un mandril con la forma de la pieza a producir de una cinta de pre-impregnado (filament winding seco) o de fibras impregnadas en resina in situ (filament winding húmedo). Sucesivas capas son aplicadas variando o no el ángulo de laminación hasta alcanzar al espesor deseado. En todo el proceso, el mandril se mantiene girando mientras el cabezal de aplicación lo recorre transversalmente cubriéndolo con las fibras.

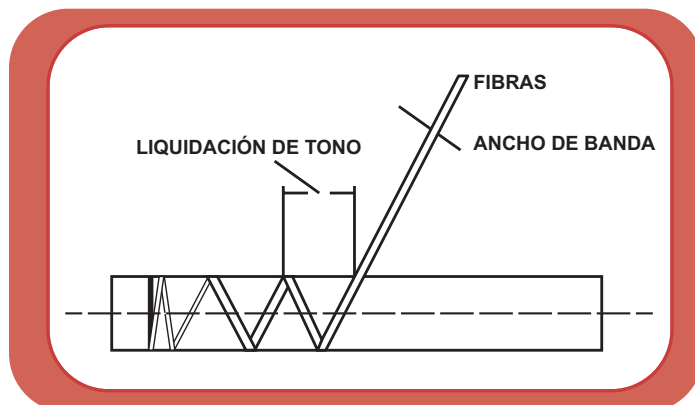
La componente principal en el proceso de filament winding es definir las velocidades del mandril y del cabezal de aplicación. Estos dos movimientos definen el ángulo de laminación. Es decir, definen las propiedades del producto.

Generalmente se definen 3 tipos de enrollamientos:

1. Circunferencial o radial: el enrollamiento es perpendicular al eje del mandril brindando resistencia a la pieza en la dirección circunferencial.

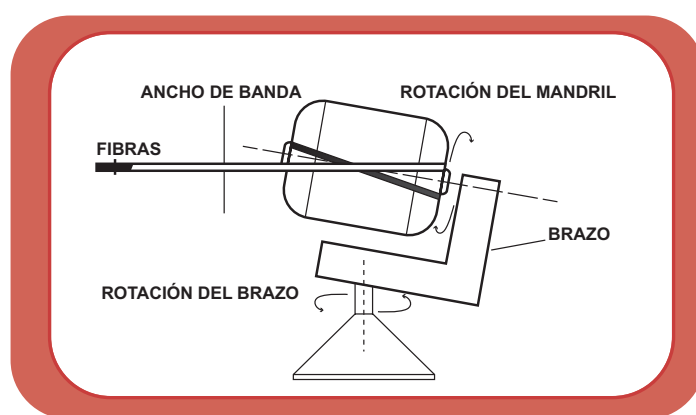


2. Helicoidal o axial y en él las fibras avanzan con un determinado ángulo en la dirección axial del mandril



3. Enrollamiento polar: es un caso especial del helicoidal en donde el paso de las fibras es

tangente a un polo del mandril y luego tangente al polo opuesto formando un plano de simetría a través de la pieza. Éste es el más simple de los diseños de pasos pero está restringido a recipientes con una relación longitud/diámetro de 1.8 o menos. Este paso es el utilizado para geometrías esféricas.

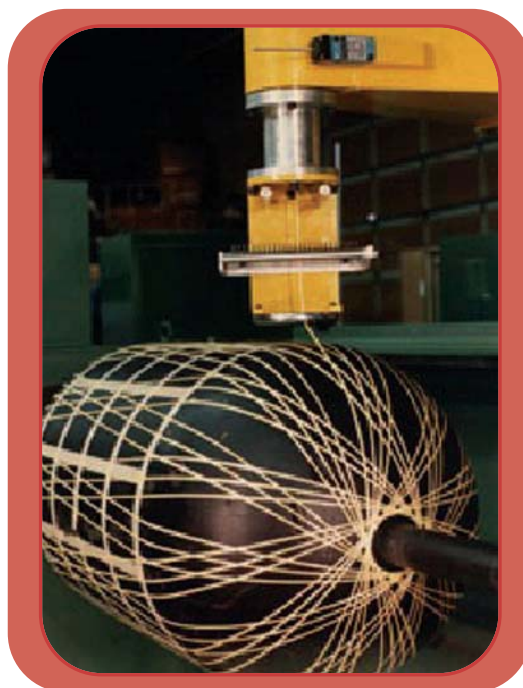


En el filament winding húmedo o por inmersión las fibras son impregnadas en una batea de impregnación, que se encuentra cercana al mandril, unos instantes antes de que sean enrolladas. En esta batea es también donde se forma la cinta de fibras.

Para el proceso de enrollamiento se puede utilizar un amplio espectro de resinas: epoxi, poliéster, vinil ester, fenólica; pero sólo fibras presentadas en bobinas.

Es un proceso muy rápido, automatizado y económico; se puede controlar muy acertadamente la concentración de resina, alcanzándose valores muy altos de fracciones en peso de fibras; por no emplearse mantas o tejidos, se minimiza el costo de la fibra a utilizar; las propiedades estructurales de los laminados pueden ser muy altas ya que las fibras pueden ser colocadas en ángulos bien definidos por el proceso.

En contrapartida, el proceso está restringido a superficies convexas; el costo del mandril puede



ser alto; la superficie externa de la pieza no está moldeada y por lo tanto puede resultar poco atractiva; el proceso de wet filament winding requiere resinas de baja viscosidad para asegurar la impregnación, por lo que a veces se debe recurrir a solventes.

Típicamente se emplea este proceso para obtener tanques de almacenaje de químicos, tuberías de transportes de productos químicos, cilindros de gas.



Productos fabricados por filament winding.

10.7.2. Compuestos de matriz metálica

Como ya se mencionó, estos materiales, reforzados con fibras metálicas o partículas cerámicas, proporcionan resistencia a alta temperatura. El aluminio reforzado con fibras de Borsic ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones aeroespaciales, incluyendo puntales para el transbordador espacial. Se han reforzado aleaciones basadas en cobre con fibras de carburo de silicio, produciendo hélices de alta resistencia para barcos.

Uno de los procesos más difundidos para la obtención de compuestos de matriz metálica con refuerzos particulados cerámicos es la **Pulvimetalurgia ó Metalurgia de Polvos**.

La **pulvimetalurgia** o **metalurgia de polvos** es un proceso de fabricación que, partiendo de polvos finos y tras su compactación para darles una forma determinada (compactado), se calientan en atmósfera controlada (sinterizado) para la obtención de la pieza.

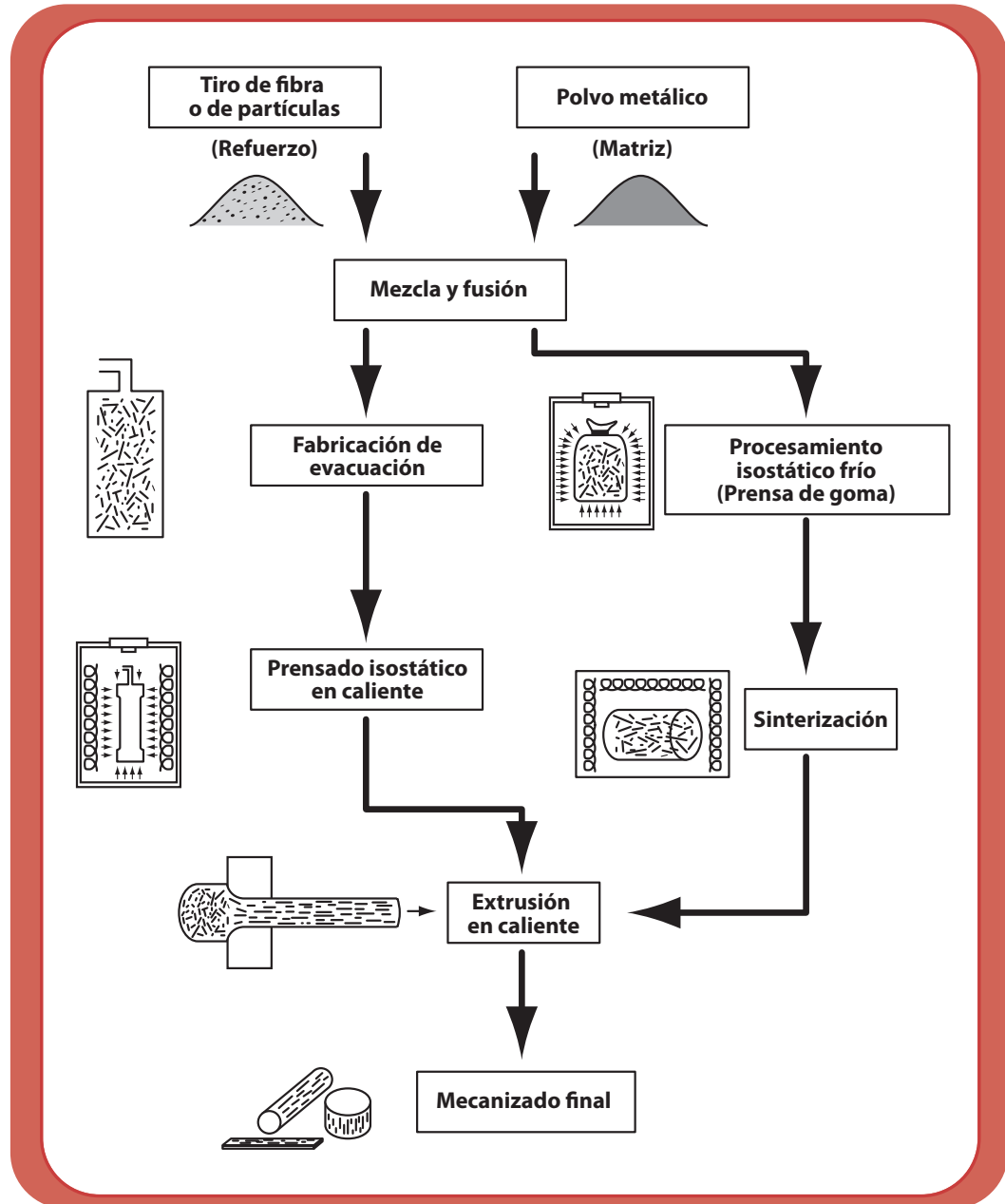
Este proceso es adecuado para la fabricación de grandes series de piezas pequeñas de gran precisión, para materiales o mezclas poco comunes y para controlar el grado de porosidad o permeabilidad.

El uso de los metales en polvos se remonta a varios centenares de años atrás. Pero fue apenas en el siglo pasado que, debido a avances tecnológicos de la segunda guerra mundial, la industria de la pulvimetalurgia se creó como tal. Desde entonces, y gracias a sus continuos avances y la calidad y utilidad de sus productos, ha crecido más rápidamente que cualquier otro proceso de manufactura de piezas metálicas.

Algunos productos típicos son rodamientos, árboles de levas, herramientas de corte, segmentos de pistones, guías de válvulas, filtros, etc.

La metalurgia de polvos hace posible una clase de materiales conocidos como CERMETS, o combinación de metales y cerámicos, con la resistencia de los metales o aleaciones y la resis-

tencia a la abrasión y al calor de los compuestos metálicos. Los CERMETS tienen diferentes aplicaciones como en aparatos químicos resistentes a la corrosión, equipo para energía nuclear, bombas para servicios severos y sistemas para manipular combustible de cohetes.



Bibliografía y webgrafía

- Antequera, P, Miravete, A., Jiménez, L. *Los materiales compuestos de fibra de vidrio*. Universidad de Zaragoza, Zaragoza (1991).
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Limusa-Wiley, México (2009).
- García Alonso, A., INASMET. *Tecnologías de producción de materiales compuestos*. INASMET, San Sebastián (1998).
- González, J.L. *Materiales compuestos: tecnología de los plásticos reforzados*. Fondo Editorial de Ingeniería Naval, Madrid (1995).
- Hull, D. , *Materiales compuestos*. Reverté, Barcelona (1987).
- INASMET. *Materiales compuestos: aplicaciones en el transporte terrestre*. INASMET, San Sebastián (1998).
- Miravete, A., Larrodé, E. *Materiales Compuestos. Tomos I y II*. A. Miravete, Zaragoza (2000).
- Miravete, A., Jiménez, L., Antequera, P. *Cálculo y diseño de estructuras de materiales compuestos de fibra de vidrio*. Secretariado de Publicaciones de Zaragoza (Geológicas), Zaragoza (1993).

http://es.wikipedia.org/wiki/Material_compuesto

<http://www.aemac.org/>