

## CAPÍTULO 7

# Materiales compuestos

## Objetivos del capítulo

En este capítulo se abordará el tema de los materiales compuestos y sus procesos de fabricación. En primer lugar, se hará mención a los distintos tipos de refuerzos y matrices de los materiales compuestos y su influencia en las propiedades de estos. Posteriormente, se describen los procesos de fabricación específicos de este tipo de materiales, ya que hay materiales compuestos que se pueden fabricar por métodos convencionales de fabricación. Por ejemplo, los materiales compuestos de matriz polimérica con fibras cortas se pueden fabricar mediante moldeo por inyección, proceso que ya se detalló en el capítulo dedicado a los polímeros. En este capítulo fundamentalmente se abordan los procesos de fabricación de los materiales compuestos de matriz polimérica termoestable.



Fuente: elaboración propia.

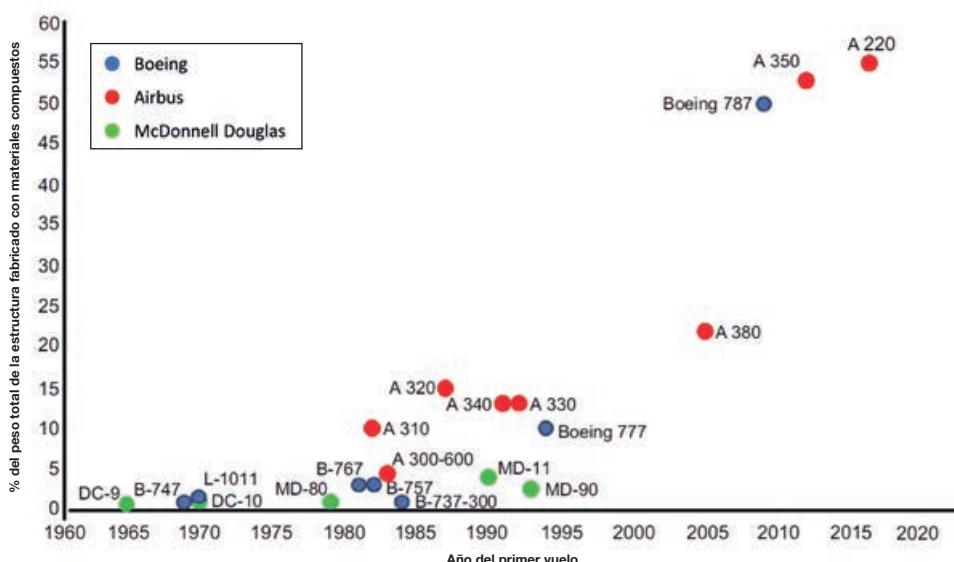
## 1. Introducción

Actualmente, la industria de la construcción e ingeniería ha empezado a conocer las ventajas de nuevos materiales estructurales de naturaleza sintética provenientes de procesos químicos sofisticados, hoy en día conocidos como materiales compuestos. Dichos materiales, en un principio, solo eran usados como materiales arquitectónicos o decorativos, pasando después a tener aplicaciones estructurales en los sectores de la construcción, en aeronáutica y posteriormente en aplicaciones de reparación, tanto estructurales como estéticas, llegando a ser conocidos estos materiales como *compuestos estructurales*.

Desde los últimos treinta años, cada vez es más evidente el uso de materiales compuestos, ya que, tiempo atrás, su aplicación era prácticamente inexistente. Las ventajas de estos materiales se han hecho cada vez más indiscutibles, sobre todo al empezar a utilizarse en aplicaciones sometidas a las acciones en ambientes agresivos, como plataformas marinas, depósitos, anclajes al terreno, construcciones no conductivas y no magnéticas, refuerzos de estructuras, armaduras pasivas, armaduras activas, cables, recubrimiento de túneles y pasarelas.

En el uso creciente de estos materiales ha jugado un papel fundamental la industria aeronáutica, en su empeño por aligerar materiales que consigan disminuir el peso de las aeronaves y, como consecuencia de ello, reduzcan el consumo de combustible. En la figura 1 se puede ver la evolución tan grande que han tenido los numerosos materiales compuestos en la estructura de los aviones comerciales.

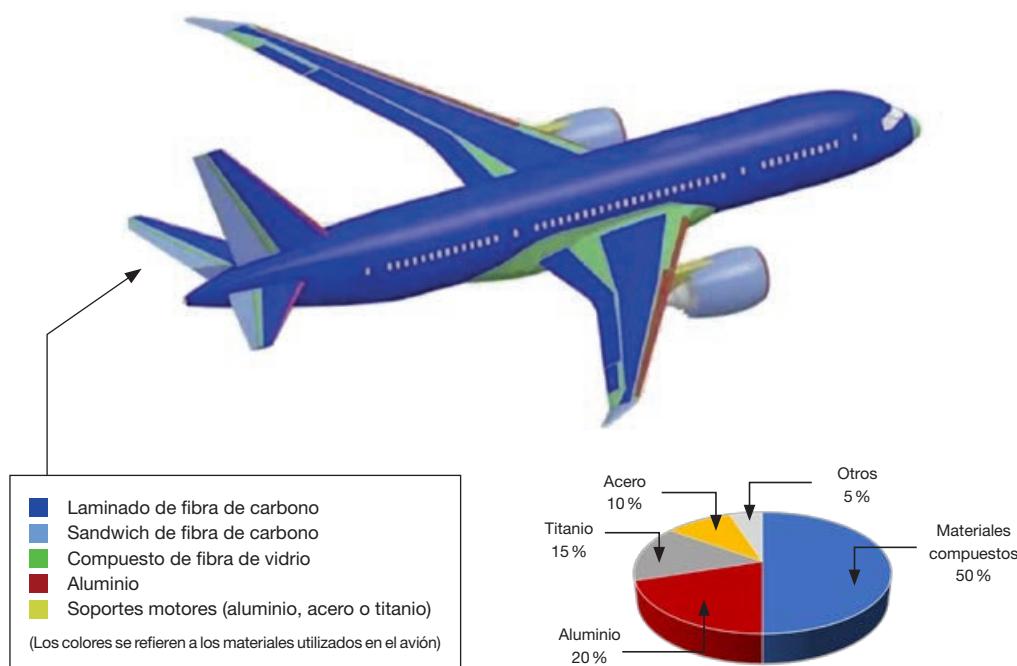
■ Figura 1. Crecimiento del uso de materiales compuestos en la estructura de aviones a lo largo de los años



Fuente: elaboración propia.

Por poner algún ejemplo sobre este crecimiento, el Boeing 777, que se lanzó en 1995, tenía un 11 % de materiales compuestos, y doce años después, el Boeing 787 ya estaba fabricándose con un 50 % de materiales compuestos. En la figura 2 se muestran los materiales utilizados en la fabricación del Boeing 787.

■ Figura 2. Materiales utilizados en el Boeing 787



Fuente: traducido de «1001crash.com». Disponible: <https://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html>.

Para poder entender y predecir hasta cierto punto el comportamiento de los materiales compuestos, es necesario conocerlos un poco más, tanto sus características como su comportamiento durante el proceso de aplicación, sin necesidad de entrar en aspectos muy complejos de ingeniería química.

Un compuesto estructural es un sistema material que se compone de dos o más fases en una escala macroscópica, cuyo comportamiento mecánico y propiedades están diseñados para ser superiores a aquellos materiales que lo constituyen cuando actúan de forma independiente. Una de las fases es usualmente discontinua, conocida como *refuerzo*, la cual es un material rígido que aporta las propiedades resistentes, y otra fase continua, llamada *matriz*, que se encarga de aportar cohesión al conjunto, transmitir los esfuerzos al refuerzo y protegerlo de los agentes externos.

Las propiedades de un material compuesto dependen de las propiedades de los elementos, geometría, y distribución de las fases. Uno de los parámetros más importantes es la fracción en volumen o en peso de refuerzo en el material compuesto. La distribución del refuerzo determina la homogeneidad o uniformidad del sistema del material.

Los tipos de refuerzos en función del tamaño pueden ser:

- Fibras largas.
- Fibras cortas. Son fibras largas cortadas, o fibras menos cuidadas que se rompen, y tienen una distribución de longitudes.
- *Whiskers*. Son monocrstales fundamentalmente de SiC y Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, por lo general con diámetros menores a 1 µm y pueden tener una longitud de hasta 100 µm.
- Partículas. Son equiaxiales.

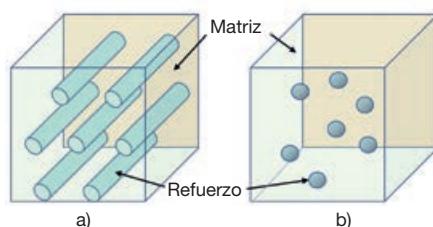
Las fases del material compuesto tienen diferentes funciones, que dependen del tipo y aplicación del material compuesto. En el caso de un material compuesto de bajo o medio comportamiento, el refuerzo es usualmente en la forma de fibras cortas o partículas, proporcionando alguna rigidez, pero solo frente a esfuerzos locales del material. Los refuerzos son el principal elemento que soporta cargas, gobernando las propiedades mecánicas del material. En el caso de compuestos estructurales de altas prestaciones, son normalmente reforzados con fibra continua, la cual es la columna vertebral del material, que determina la rigidez y refuerzo en la dirección de la fibra. Los esfuerzos locales se transfieren de una fibra a otra. La interfase puede jugar un importante papel en controlar el mecanismo de fractura, la fuerza para fracturar y, en conjunto, el comportamiento del material, ya que es el lugar por donde se transmiten los esfuerzos desde la matriz a las fibras.

La matriz es la encargada de mantener la forma de la estructura, así como de transmitir los esfuerzos a las fibras y protegerlas del ambiente exterior.

La disposición geométrica y su orientación frente a las cargas aplicadas que vaya a tener el componente es fundamental y, lógicamente, debe conocerse previamente cómo van a trabajar la pieza. En la figura 4 se muestra la resistencia a la tracción de una plancha de material compuesto orientada con las fibras en distintas direcciones respecto al esfuerzo. Lógicamente, los mejores resultados se obtienen en dirección longitudinal a la fibra.

Para conocer la distribución de los esfuerzos en las piezas a fabricar se hacen estudios previos, y los modernos softwares de simulación han ayudado mucho a conocer cómo es la distribución de los esfuerzos.

Figura 3. Material compuesto reforzado a) con fibras, b) con partículas



Fuente: elaboración propia.

Los materiales compuestos pueden operar en ambientes hostiles durante largos períodos de tiempo. Estos materiales tienen grandes períodos de vida bajo fatiga y su mantenimiento y reparación son muy fáciles. Sin embargo, presentan sensibilidad a ambientes donde existen cambios severos de humedad en la atmósfera, causando daños durante su vida de servicio, y pudiendo aumentar los daños internos.

Para poder detectar y pronosticar estos posibles daños, se requiere de sofisticadas técnicas no destructivas. Algunas veces es necesaria la aplicación de capas protectoras contra la erosión, el daño superficial y contacto con la luz, principalmente la luz solar, ya que esta es portadora de los rayos ultravioleta, los cuales son causantes de que se rompan los enlaces de las cadenas moleculares de los polímeros.

## 2. Refuerzos

Los refuerzos son los que soportan las cargas y, por tanto, proporcionan la resistencia mecánica. Los refuerzos deben orientarse en las direcciones de los esfuerzos.

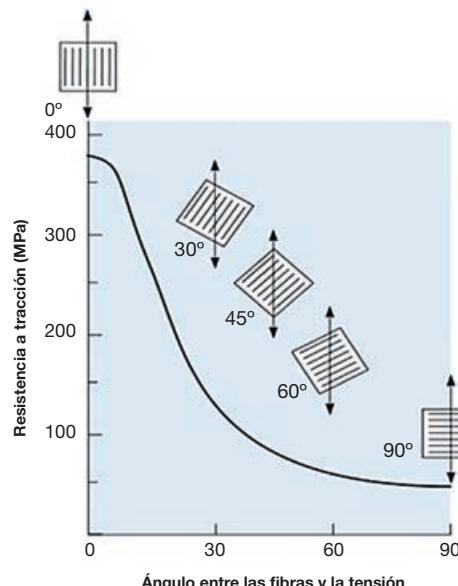
### 2.1. Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio se usan para reforzar muchos tipos de matrices en las que no se precisen unos requisitos demasiado exigentes. El vidrio es, con mucho, la fibra más utilizada, siendo además la de menor coste. Los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio tienen las siguientes características favorables:

- Buena relación resistencia/peso.
- Buena estabilidad dimensional.
- Buena resistencia al calor, al frío, a la humedad y a la corrosión.
- Buenas propiedades aislantes eléctricas.

En el capítulo 5 ya se mencionaron los tipos de fibras de vidrio, en función de las características de uso. Las dos clases más importantes de fibra de vidrio utilizadas para fabricar materiales compuestos son los vidrios E (eléctricos) y los vidrios S (de alta resistencia).

**Figura 4. La orientación de las fibras en un material compuesto es muy importante y determina completamente su resistencia mecánica**



Fuente: elaboración propia.

Los vidrios E son los más utilizados en la fabricación de fibras continuas. Básicamente, el vidrio E es un vidrio de borosilicato de calcio y aluminio, con muy bajo o nulo contenido en potasio y sodio. El vidrio E no modificado tiene una resistencia a la tracción de 3,44 GPa y un módulo de elasticidad de 72,3 GPa.

Los vidrios S tienen una relación resistencia/peso más alta, y son más caros que los vidrios E. Estos vidrios se utilizan principalmente en aplicaciones militares y aeroespaciales. Su resistencia a la tracción está sobre los 4,48 GPa y poseen un módulo de elasticidad de unos 85,4 GPa. El diámetro de las fibras comerciales de vidrio E está entre 8 y 15 µm, siendo con frecuencia de 11 µm.

La resistencia y el módulo elástico del vidrio están determinados en principio por la estructura tridimensional de los óxidos constituyentes. A diferencia de las fibras de carbono y Kevlar 49, las propiedades de las fibras de vidrio son isótropas, de forma que, por ejemplo, el módulo de Young a lo largo del eje de la fibra es el mismo que transversalmente al eje. Esto es consecuencia directa de la estructura tridimensional de la red del vidrio.

En términos generales, las fibras de vidrio presentan una elevada resistencia a la tracción, no arden, ni contribuyen a la combustión debido a su naturaleza inorgánica y soportan ambientes de temperatura elevada. Presentan buena resistencia química y no resultan afectadas por hongos ni bacterias. Tampoco absorben humedad, poseen un coeficiente de expansión térmica lineal bajo y una conductividad térmica elevada. Eléctricamente son no conductoras y poseen una baja constante dieléctrica. Evidentemente, todo es relativo y la mayor o menor bondad de las propiedades solo puede determinarse comparando los valores concretos que son necesarios para efectuar cualquier selección de un material.

Las fibras de vidrio son más baratas que la mayor parte de las fibras de refuerzo, y se manejan bien, no requiriendo equipamientos ni tecnologías complicadas, por lo que probablemente sigan siendo la fibra más utilizada en aplicaciones generales. Su desventaja fundamental es un módulo elástico bajo en comparación con otras fibras de refuerzo, y una densidad alta (2,54 g/cm<sup>3</sup> para el vidrio E), por lo que no se utilizan en estructuras que exigen elevadas características mecánicas y peso bajo.

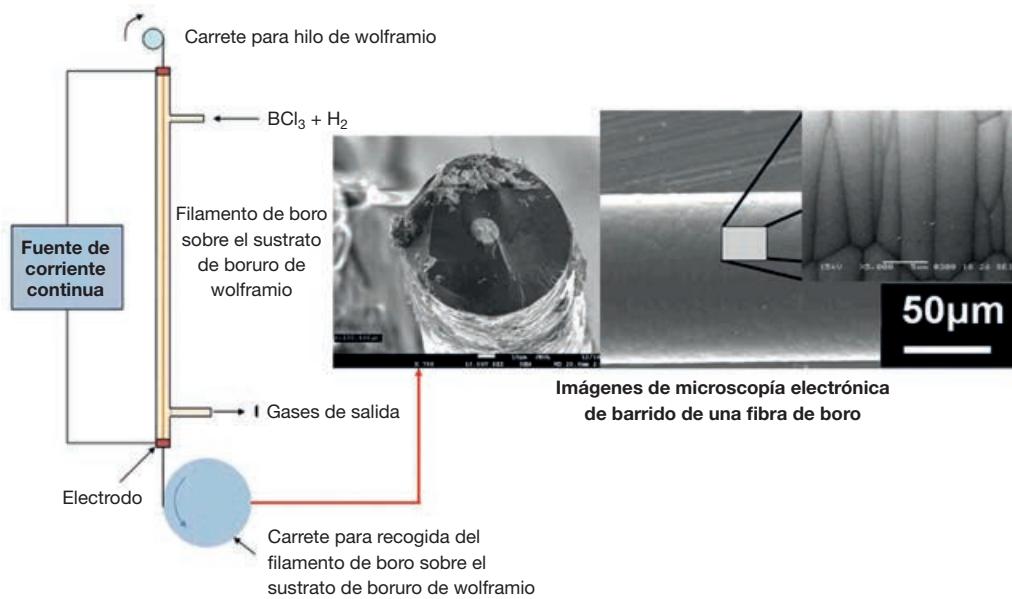
En el capítulo 5 de este manual se describió el proceso de fabricación de la fibra de vidrio.

## 2.2. Fibras de boro

Las fibras de boro se producen mediante deposición química en fase vapor de boro gaseoso (mezcla de tricloruro de boro,  $\text{BCl}_3$ , e hidrógeno,  $\text{H}_2$ ) sobre un filamento de wolframio de unas 12 micras de diámetro que se mantiene incandescente haciendo circular una corriente eléctrica continua por él, mientras se pasa a través de un reactor vertical de vidrio. El filamento se va transformando en diboruro de wolframio y, una vez saturado, continúa depositándose sobre él una capa amorfa de boro puro, proporcionando una superficie rugosa (tiene aspecto de mazorca de maíz) bien adecuada para unirse estrechamente con matrices poliméricas.

En una primera etapa del reactor, el sustrato de (W) se calienta en atmósfera no reactiva para desgasificarlo y limpiarlo y, en la segunda, se calienta hasta unos 1350 °C para lograr la deposición del boro a presión atmosférica. La longitud total del reactor es de unos 2 m y la producción de filamento de boro no llega a 1 kg semanal.

■ Figura 5. Esquema de fabricación e imágenes de la fibra de boro



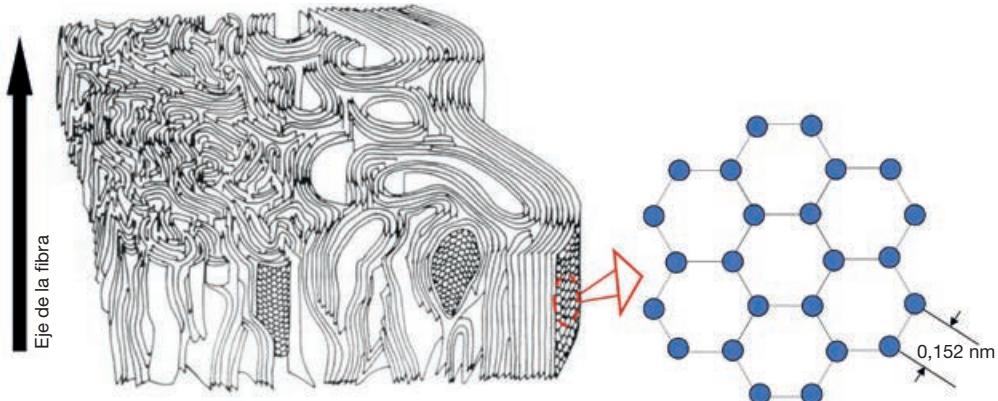
Fuente: elaboración propia.

## 2.3. Fibras de carbono

Las fibras de carbono deben sus excepcionales propiedades a la naturaleza de la estructura cristalográfica del grafito, con sus átomos unidos mediante fuertes enlaces covalentes formando planos que, durante el proceso de fabricación de las fibras, se tratan de alinear con la dirección del eje de estas.

El módulo de elasticidad y resistencia a la tracción teórica en dirección paralela a los planos basales de grafito son del orden de 1000 GPa y 100 GPa, respectivamente. En una fibra real de carbono, debido a múltiples defectos introducidos durante el proceso de fabricación, no se llegan a alcanzar esos valores, sobre todo en el caso de la resistencia, aunque hoy día se están consiguiendo módulos de elasticidad cercanos a los 800 GPa y resistencias de 7 GPa.

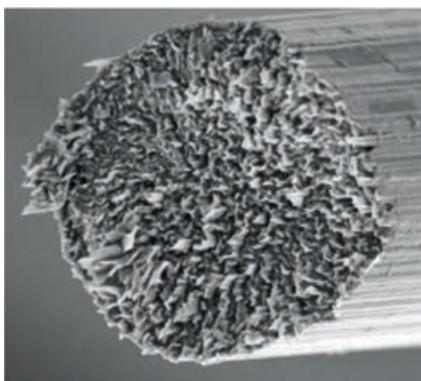
■ Figura 6. Estructura tridimensional de una fibra de carbono formada por distintas láminas de grafito



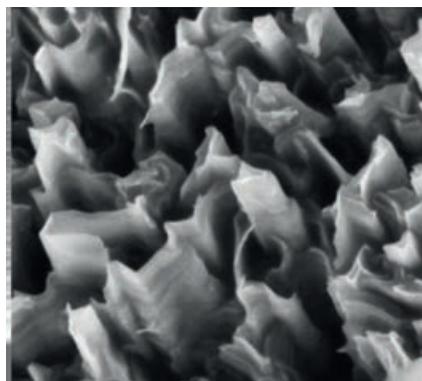
Fuente: elaboración propia.

■ Figura 7. Fibra de grafito de alto módulo vista al microscopio electrónico de barrido

a) 8000 aumentos



b) 50000 aumentos



Fuente: elaboración propia.

Las fibras de carbono pueden clasificarse, de acuerdo con las últimas propuestas internacionales, de tres modos diferentes:

- En función de la temperatura final del tratamiento térmico de su conversión. Se pueden clasificar en fibras de carbono de tratamiento térmico elevado (HTT), fibras de carbono de tratamiento térmico intermedio (IHT) y fibras de carbono de tratamiento térmico bajo (LHT).

- En función del precursor utilizado. Se clasifican en fibras de carbono base «PAN» (poliacrilonitrilo), fibras de carbono base alquitrán (pitch), fibras de carbono base mesofase de alquitrán, fibras de carbono base alquitrán isotrópico, fibras de carbono base rayón y fibras de carbono de crecimiento a partir de fase gaseosa.
- En función en las propiedades mecánicas de la fibra:
  - Tipo UHM, (*ultra high module*). De módulo mayor de 500 GPa.
  - Tipo HM, (*high module*). Con módulo mayor de 300 GPa y relación entre resistencia y módulo menor del 1 %.
  - Tipo IM, (*intermediate module*). Con módulos de hasta 300 GPa y relación entre resistencia y módulo mayor del 1 %.
  - Tipo «bajo módulo». Con rigideces de alrededor de 100 GPa y resistencias también bajas. Se trata de fibras con una estructura isotrópica.
  - Tipo HT, (*high resistance*). Con resistencias en tracción mayores de 3000 MPa y relaciones entre resistencia y rigidez entre 1,5 % y 2 %.

Las fibras de carbono tienen una disposición de capas de grafito unidas entre sí para formar la fibra, tal y como se muestra en la figura 6. La alta resistencia de las fibras de carbono se basa en la alineación de las capas de grafito. La resistencia la proporcionan los enlaces de carbono que hay en las capas de grafito. La unión entre capas apenas presenta resistencia, ya que las distintas capas se unen entre sí por enlaces débiles por las fuerzas de Van der Waals.

La resistencia de los distintos tipos de fibra de carbono reside en cómo se consigue alinear las capas en la dirección de la fibra.

La fabricación de las fibras de carbono se realiza básicamente «cociendo» fibras sintéticas poliméricas para eliminar de su estructura todos los elementos, a excepción de la «espina dorsal», de carbono de dichas fibras. Las fibras de polímeros de partida se denominan *precursores*.

En la actualidad, las fibras de carbono se obtienen de tres tipos fundamentales de precursores:

- El poliacrilonitrilo (PAN). Da lugar a fibras de buenas propiedades y coste asequible. Es el más usado en la actualidad.
- El rayón (celulosa regenerada). Cada vez menos utilizado. Produce fibras considerablemente más caras debido a las elevadísimas temperaturas necesarias para su adecuada grafitización.
- El «alquitrán», «brea» o «betún de asfalto» (subproducto de la producción del petróleo). Da lugar a las fibras de menor coste debido a lo barato del precursor. Se encarecen más o menos dependiendo de las condiciones del tratamiento térmico utilizado en la conversión de la fibra.

De forma resumida, lo que se pretende con el proceso es partir de un precursor, por ejemplo, fibras de PAN, hacer que las cadenas de polímero se alineen en la dirección de la

fibra y, posteriormente, se va eliminando todo lo que no sea carbono y, a la vez, hace que se enganchen unas fibras con otras para formar «capas» monoatómicas, en las que los enlaces covalentes que forman la lámina de grafito estén en la dirección de la fibra.

Aun cuando las técnicas de conversión pueden variar dependiendo del precursor utilizado y del fabricante, en líneas generales el proceso de conversión, denominado *pirolización*, consta de las siguientes etapas:

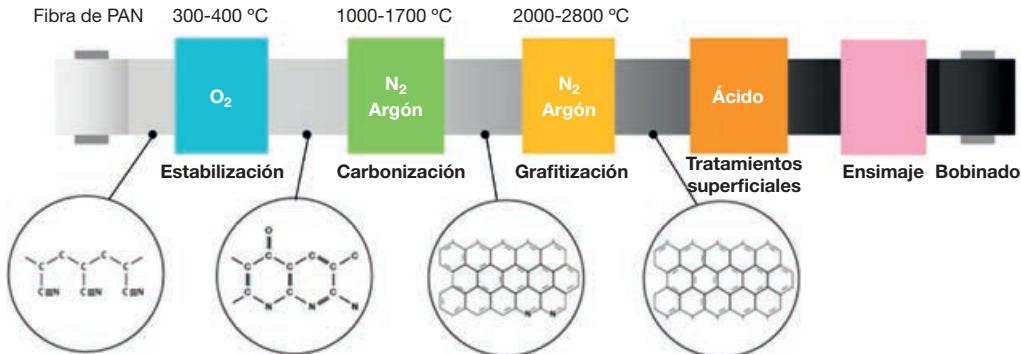
- Estabilización. Fase de oxidación en la que las fibras precursoras son sometidas a tensión (para mejorar la orientación molecular) calentándolas lentamente hasta que se hacen pasar a través de un horno a una temperatura ligeramente inferior a 400 °C, tratando, igual que en las dos fases posteriores, de infligir a la fibra el menor daño posible. Este proceso en atmósfera de oxígeno hace que las fibras sean infusibles, manteniendo además los filamentos que conforman las distintas hebras separados entre sí.
- Carbonización. Proceso que debe realizarse en atmósfera inerte y que puede realizarse de dos formas, en función de las propiedades que se busquen:
  - Entre 800 y 1200 °C, en atmósfera de nitrógeno.
  - Entre 1000 y 1700 °C, en atmósfera de argón.

En esta fase se reducen los niveles de impurezas y se incrementa la cristalinidad.

- Grafitización. Esta etapa es opcional, y se realiza en atmósfera inerte, normalmente de argón, y a temperaturas por encima de los 2000 °C (hasta 2800 °C), disminuyéndose aún más el nivel de impurezas y estimulándose el crecimiento cristalino. Pasamos de un carbono amorfó a grafito.
- Tratamientos superficiales. Encaminados esencialmente a controlar la interacción de la fibra con la matriz, por ejemplo, los grupos hidroxilo y amina, sobre la superficie de la fibra, mejoran la respuesta a cortadura del laminado, si se utiliza posteriormente para impregnar las fibras en una matriz epoxi. Normalmente, para realizar este tratamiento, tras la carbonización o la grafitización, la fibra se enfriá y su superficie se ataca con ácido y se oxida para mejorar el enlace interfacial entre las fibras y matrices.
- Aplicación de ensimajes y terminaciones a los haces de fibras para mejorar sus características de manipulación y mejorar la compatibilidad con la matriz.
- Bobinado en ovillos o carretes para posteriormente impregnarlas, tejerlas, trenzarlas, etc.

Los filamentos individuales de carbono suelen tener un diámetro comprendido entre 5 y 10 µm, y se suministran en hebras, haces o manojos (en inglés *tows*) que para aplicaciones industriales suelen constar de 500 (1/2k), 1000 (k), 3000 (3k), 6000 (6k), 12000 (12k) y 24000 (24k) filamentos por hebra. Las hebras de menor número de filamentos suelen utilizarse para devanado, tejido, trenzado o tricotado, y las de mayor número, para cintas unidireccionales, aunque también existen cintas unidireccionales con hebras de bajo número de filamentos para aplicaciones especiales.

■ Figura 8. Proceso de fabricación de la fibra de carbono.



Fuente: elaboración propia.

## 2.4. Fibras orgánicas

Recordemos que los polímeros termoplásticos son macromoléculas lineales o ramificadas, cuyas cadenas pueden estar ordenadas en una dirección preferente o al azar. El concepto de *fibras orgánicas* está basado, teóricamente, en la creación de fibras con una alta resistencia y alto módulo de elasticidad, a partir de una perfecta alineación de las cadenas de polímeros, con el fin de conseguir que sean los enlaces covalentes los que soporten la carga. Podemos tomar como ejemplo las largas cadenas de polietileno, que constan de cadenas de carbono unidas directamente en zigzag, completamente alineadas y agrupadas estrechamente, que tienen un módulo de elasticidad teórico de aproximadamente 220 GPa. Actualmente, se trata de fabricar fibras de polietileno de alta densidad y elevado módulo de elasticidad, donde se busca la máxima linealidad y alargamiento entre las cadenas de los polímeros durante el proceso de fabricación, en las etapas de hilado y estirado.

En la figura 9 se muestra los diferentes niveles de morfología (micro y macroscópica) de diferentes fibras orgánicas.

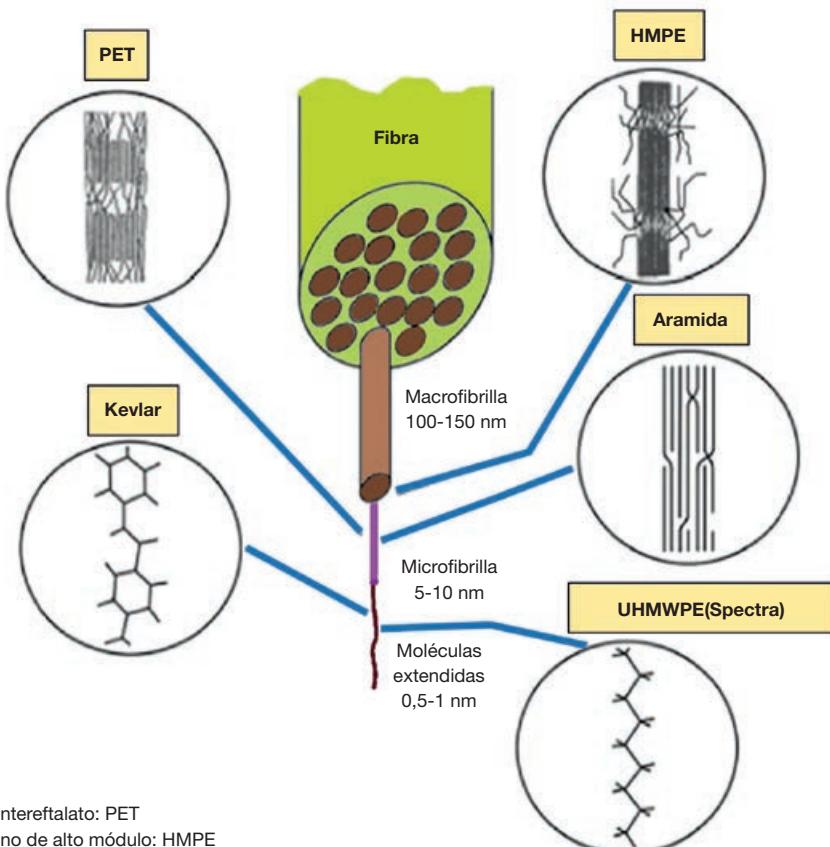
Las fibras orgánicas más comunes en el mercado son las fibras de poliaramida (cuyo monómero presenta un grupo aromático y una amida). Las fibras de poliaramida más conocidas son el Kevlar® y el Nomex®.

Las fibras de poliaramida fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont, bajo el nombre comercial de Kevlar®, del que en la actualidad hay dos tipos comerciales: Kevlar 29 y Kevlar 49. Ambos presentan una baja densidad y alta resistencia, y módulo elástico aportado por las fibras de aramida.

- El Kevlar 29 es la fibra tal y como se obtiene de su fabricación, y está diseñado para la fabricación de tejidos y para aplicaciones como protección balística, cuerdas y cables. No es para fabricar materiales compuestos.

- El Kevlar 49 se emplea cuando las fibras se van a embeber en una resina para formar el material compuesto. Las propiedades del Kevlar 49 hacen a estas fibras útiles para la fabricación de materiales compuestos en aplicaciones aeroespaciales, en marina, automoción y otras aplicaciones industriales.

■ Figura 9. Morfologías de distintas fibras



Polietilentereftalato: PET

Polietileno de alto módulo: HMPE

Aramida

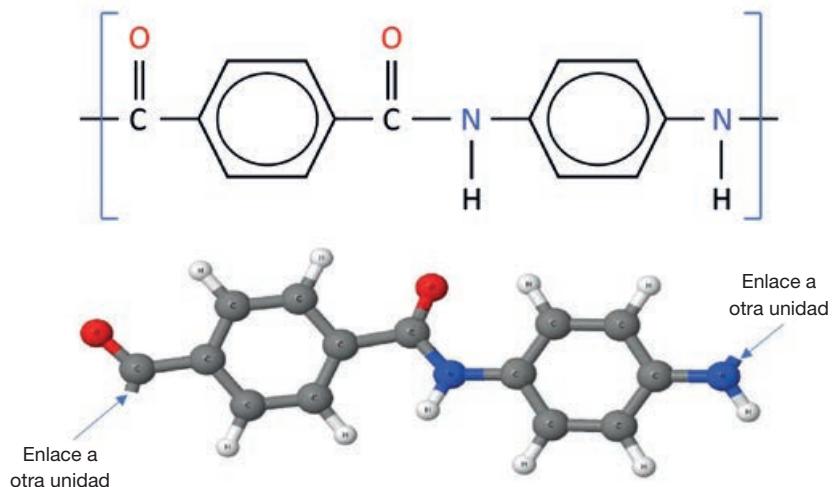
Kevlar®

Polietileno de ultra alto peso molecular: UHMWPE(Spectra®)

Fuente: elaboración propia.

La unidad química que se repite en la cadena del polímero Kevlar es la de la poliamida aromática que se muestra en la figura 10. En conjunto, estas fibras tienen una alta resistencia en la dirección de la fibra.

■ Figura 10. Estructura de la fibra de Kevlar

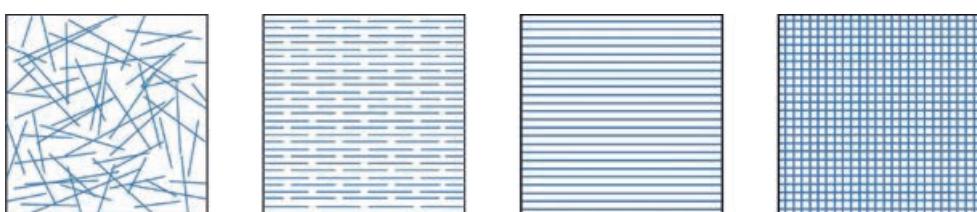


Fuente: elaboración propia.

### 3. Arquitectura del refuerzo

Dependiendo de cómo vayan a estar aplicados los esfuerzos sobre la pieza a diseñar, así se tendrá que disponer el refuerzo para que sea más efectivo. En la figura 11 se esquematizan algunas posibilidades.

■ Figura 11. Distintas disposiciones que puede tener el refuerzo



Fuente: elaboración propia.

Las fibras se pueden comercializar en distintos formatos. Veamos cada uno de ellos.

### 3.1. Haces de fibras, mecha o *roving*

Es un mazo de entre 3000 y 24000 fibras (3k y 24k), con o sin torsión. La torsión se usa para que, en caso de rotura de una fibra, no se produzca deshilachamiento, aunque puede presentar el inconveniente de dificultar la entrada de la resina, por lo que tienden a fabricarse sin torsión.

■ Figura 12. ***Roving* de varios tipos de fibra (vidrio, carbono y Kevlar)**



Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Cinta unidireccional o tapes

Las cintas unidireccionales vienen siempre preimpregnadas de resina en forma de carrete de entre 10 y 20 cm, y está realizado con *roving* sin trenzar. Va protegido con papel parafinado para evitar que se adhieran unas capas a otras al enroillarse. Presenta un espesor de alrededor de 0,2 mm, con unos 3000 filamentos.

Proporciona las máximas propiedades mecánicas que se puedan alcanzar, ya que no presenta ondulaciones como en los tejidos, pero la manipulación manual es muy difícil.

Normalmente se apilan capas en distintas direcciones para conseguir que la pieza aguante los esfuerzos complejos y multidireccionales.

El uso de este tipo de arquitectura permite optimizar las propiedades de la pieza, ya que se pueden alinear distintas capas en las direcciones preferentes. Es fundamental contar con un análisis de los esfuerzos que va a soportar la pieza.

Figura 13. **Cinta unidireccional de fibra de carbono**



Fuente: elaboración propia.

### 3.3. Telas

Para facilitar la fabricación de piezas, se usan los haces de fibras tejidas para conseguir mayores contenidos de refuerzo. El problema de aumentar el gramaje es la posibilidad de que se marque la textura, por lo que a veces se usa un velo de superficie (tejido de un gramaje muy fino) para evitar que la textura se marque en la pieza.

La nomenclatura y las formas de construirlos se han adoptado de la industria textil.

Los tejidos comerciales más comunes son los que están compuestos por dos hilos, unos longitudinales y otros transversales. A los longitudinales se les denomina *urdimbre*, mientras que a los transversales son denominados *trama*. En la figura 14 se puede apreciar mejor esta disposición. La trama es un único hilo, mientras que la urdimbre son distintos hilos individuales.

Para la fabricación de estos tejidos se colocan los hilos de la urdimbre en posición vertical y va entrecruzándose en horizontal el hilo de la trama entre los hilos de la urdimbre.

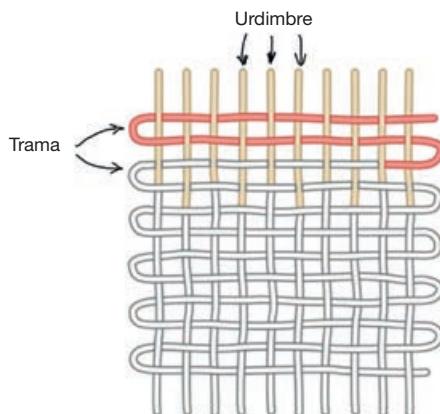
La forma de entrecruzarse los hilos se denomina *ligamento*, y cada vez que un hilo de trama pasa entre los hilos de la urdimbre se le llama *pasada*.

Los tejidos pueden ser planos o tricotados. Los más usados son los tejidos planos, y estos se pueden clasificar, según se entrelacen los hilos de la trama y la urdimbre, en los siguientes:

- Ligamento de tafetán o, en inglés, *plain weave*. Es el más básico. Su forma de tejido es un hilo de trama por un hilo de urdimbre, por lo tanto, en una pasada el hilo de trama va uno por arriba y uno por abajo de la urdimbre, y así sucesivamente.
- Ligamento de sarga o, en inglés, *twill weave*. Es un ligamento que pasa un hilo de trama por cada dos hilos de urdimbre. Se caracteriza por sus líneas diagonales que diferencian a este tejido, normalmente a  $45^\circ$ , pero que pueden ir de los  $15$  a  $75^\circ$ .
- Ligamento de satén, raso o, en inglés, *satin weave*. Es un ligamento que pasa un hilo de trama por cada cuatro hilos de urdimbre.

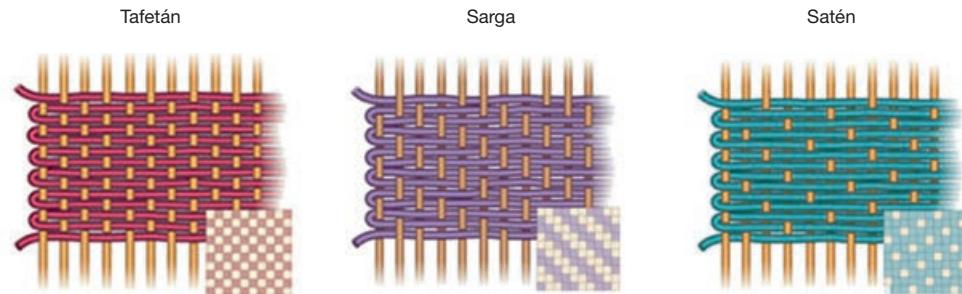
Las telas pueden estar preimpregnadas o no. Las telas preimpregnadas, en inglés, *prepreg*, llevan ya la mínima cantidad de resina, lo que hace que la eliminación del sobrante sea más fácil. Son las que se utilizan para piezas de alta responsabilidad, como las utilizadas en la industria aeronáutica.

Figura 14. Disposición de la trama y urdimbre para la confección de tejidos.



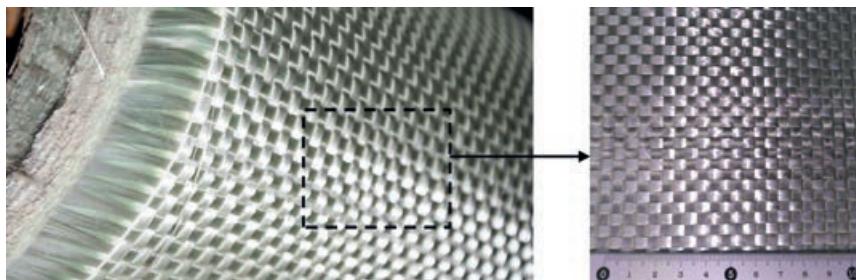
Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Disposición de la trama y urdimbre para la confección de distintos ligamentos (en la esquina inferior se muestra el aspecto visual de cada uno de ellos)



Fuente: elaboración propia.

■ Figura 16. Tejido de tafetán de fibra de vidrio



Fuente: elaboración propia.

Además de las telas también se pueden encontrar estructuras trenzadas y tricotadas (como si fuese un jersey hecho de punto) para algunas aplicaciones específicas.

### 3.4. Mats o fieltros

Este término se adopta del inglés que significa «felpudo». Son fibras cortas dispuestas aleatoriamente. Normalmente es de fibra de vidrio, ya que las fibras cortas apenas se utilizan en carbono, poliaramida, etc. Se comercializa en forma de tela

■ Figura 17. Mat de fibra de vidrio



Fuente: elaboración propia.

con fibras cortas de vidrio con haces de unas 100 a 300, unidos mediante un ligante. Al estar las fibras dispuestas aleatoriamente, se obtienen unas propiedades isotrópicas (dentro de la lámina) de la pieza acabada.

### 3.5. Preformas tridimensionales

Las preformas tridimensionales como las que se muestran en la figura 18 están fabricadas de fibras cortas ordenadas aleatoriamente. Esto es una solución económica para productos de tecnología media.

■ Figura 18. **Preformas tridimensionales**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6. Estructuras en tres dimensiones

Las estructuras complejas, son tejidos, trenzados o tricotados en tres dimensiones, y normalmente son para piezas de alta responsabilidad.

■ Figura 19. **Estructuras tridimensionales**



Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Preimpregnados o *prepregs*

Los materiales preimpregnados fueron desarrollados para aplicaciones en las que se requería un elevado porcentaje de refuerzo con la menor cantidad posible de matriz, pero que a la vez hubiera una gran uniformidad en el contenido de resina. Pueden estar formados por cualquiera de los refuerzos presentados en una de las anteriores formas, e impregnados en una resina termoestable. Normalmente, la matriz es de un polímero termoestable, que está parcialmente curado de forma que permita la manipulación. Necesitan almacenarse a bajas temperaturas (entre  $-15$  y  $-20$  °C) para evitar que se produzca la reticulación completa del polímero.

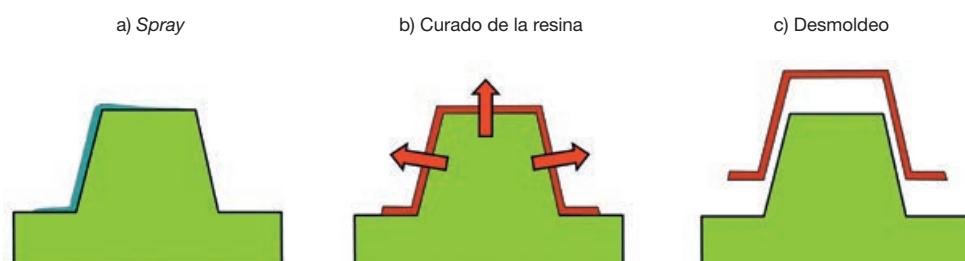
## 4. Procesos de conformado

Se van a estudiar primeramente los procesos en molde abierto (depositión por proyección, impregnación mediante resina líquida manual, arrollamiento de filamentos, consolidación de *prepreg*) para pasar a los de molde cerrado (pultrusión y moldeo por transferencia de resina).

### 4.1. Depósito por proyección

El proceso es sencillo y se detalla en la figura 20. El molde debe prepararse previamente para facilitar el desmoldeo de la pieza. Sobre este molde se realiza la deposición proyectando con una pistola (figura 21), en la cual se introduce el refuerzo en forma de *roving*, la resina y el catalizador. Al proyectarse se rompen las fibras, formándose un proyectado de fibras cortas. Una vez que se realiza la deposición sobre el molde, se espera el tiempo necesario para que se produzca el curado de la pieza. Una vez transcurrido este tiempo, se procede a desmoldear.

■ Figura 20. Esquema del proceso de deposición por proyección



Fuente: elaboración propia.

■ Figura 21. Pistola para proyección



Fuente: elaboración propia.

Las características fundamentales radican en la sencillez y rapidez del método para la aplicación del refuerzo y la matriz en un solo paso. Necesita un equipamiento moderadamente barato. La arquitectura del refuerzo es aleatoria, ya que solo puede alinear las fibras en una dirección. Además, deben extremarse los cuidados en el mantenimiento de la limpieza del ambiente de trabajo, ya que puede producir daños a los trabajadores.

Las calidades de las piezas dependen en gran medida de los parámetros de las pistolas con las que se hace la proyección y de la experiencia y la habilidad de los operarios.

#### 4.2. Impregnación mediante resina líquida manual

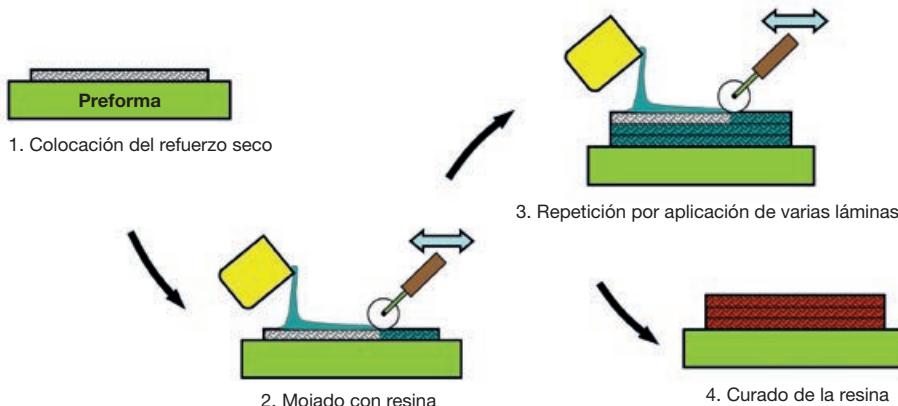
Este tipo de proceso se utiliza mucho para realizar piezas de tamaño medio, que no precisan unos requerimientos demasiado exigentes.

Sobre la preforma de refuerzo que, como en el caso anterior, ha de ser preparada previamente para el posterior desmoldeo, se vierte de forma manual la resina líquida forzándola a penetrar en la preforma mediante un rodillo que favorece la eliminación de las posibles burbujas. Se repite la operación con nuevas capas, si fuera preciso, y posteriormente se produce el curado, que puede realizarse mediante agentes químicos o aumentando la temperatura. Una vez que la pieza tiene la suficiente rigidez como para poder ser manipulada, puede procederse al desmoldeo de la pieza.

Este tipo de procesos es muy utilizado en la pequeña industria, así como en la reparación de vehículos y embarcaciones. Además, para mejorar la relación refuerzo/matriz, es decir, para aumentar la cantidad de refuerzo en aplicaciones con mayores requerimientos mecánicos, se suele proceder al curado en bolsa de vacío, que se conecta a una bomba de vacío para

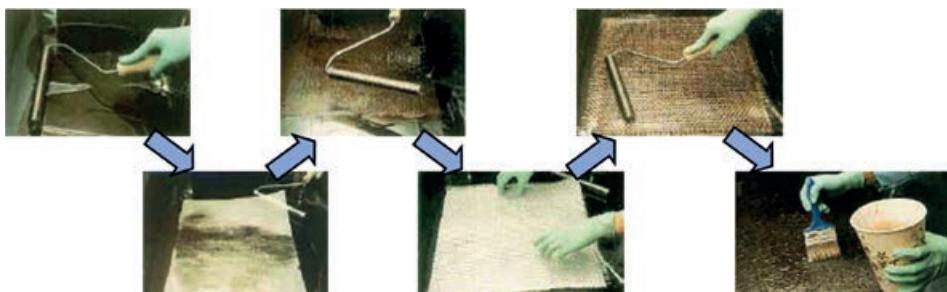
así eliminar el exceso de resina aplicado. También se puede aplicar presión por el exterior de la bolsa de vacío para mejorar el proceso. La ventaja fundamental del método es la obtención de piezas con una mayor homogeneidad y con un nivel de porosidad bastante menor.

■ Figura 22. Esquema del proceso de impregnación mediante resina líquida



Fuente: elaboración propia.

■ Figura 23. Detalle del proceso de impregnación manual



Fuente: elaboración propia.

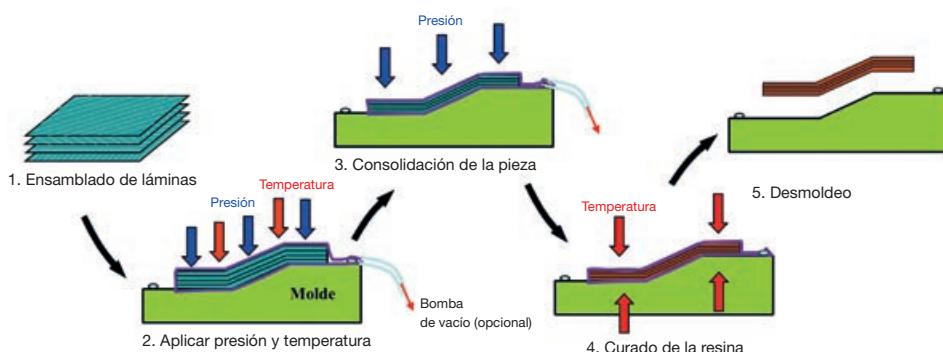
#### 4.3. Consolidación de preimpregnados o *prepreg*

Es importante remarcar que los preimpregnados deben almacenarse a temperaturas bajo cero, en cámaras frigoríficas, para evitar que se produzca la polimerización de la resina que está prepolimerizada en el preimpregnado.

Este proceso, también denominado *moldeo de láminas*, consiste, según se expone en la figura 24, en el apilamiento de las láminas de preimpregnado, de forma manual, cortándolas de manera que se adapten a la forma del molde, y con las direcciones del refuerzo adecuadas, que han sido previamente estudiadas. Una vez realizado el proceso, se procede a la aplicación de presión y calor, la resina prepolymerizada se comporta como un polímero termoplástico y funde y, para ayudar a eliminar el exceso, se aplica presión y/o vacío. A continuación, se incrementa la temperatura para que se produzca el curado de la resina termoestable, y que la pieza consolide.

Además, pueden hacerse variaciones a este método, como el curado en bolsa de vacío y el curado en el interior de autoclave para la aplicación de presión a la vez que se aplica el calor necesario para la consolidación.

■ Figura 24. Esquema de consolidación de preimpregnados (*prepregs*)



Fuente: elaboración propia.

#### 4.4. Arrollamiento de filamentos o *filament winding*

Es un proceso para construir piezas con geometría de revolución, en el que se va aportando la fibra seca en forma de *roving*, que mientras se mantiene bajo tensión se sumerge en un baño de resina líquida ya catalizada y se va arrollando sobre un molde normalmente de polietileno denominado *mandril*, con un determinado patrón para conseguir las propiedades mecánicas adecuadas según como vayan a estar aplicados los esfuerzos sobre la pieza, normalmente a 45º del eje longitudinal.

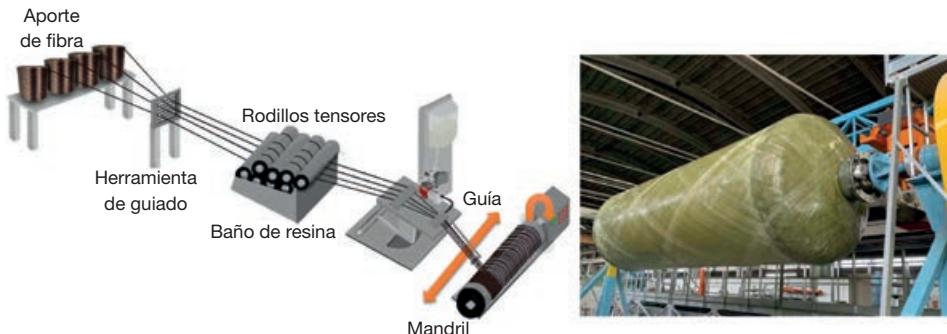
A la vez que se produce el movimiento del eje del mandril, se mueve el carro portafibras horizontalmente.

El tiempo de proceso está limitado por el tiempo de curado de la resina. El curado de la resina se suele realizar en un horno. Tras el curado de la resina se procede a retirar el mandril.

Las propiedades mecánicas de la pieza final dependen en gran medida de parámetros del proceso, tales como tensión y ángulo de las fibras.

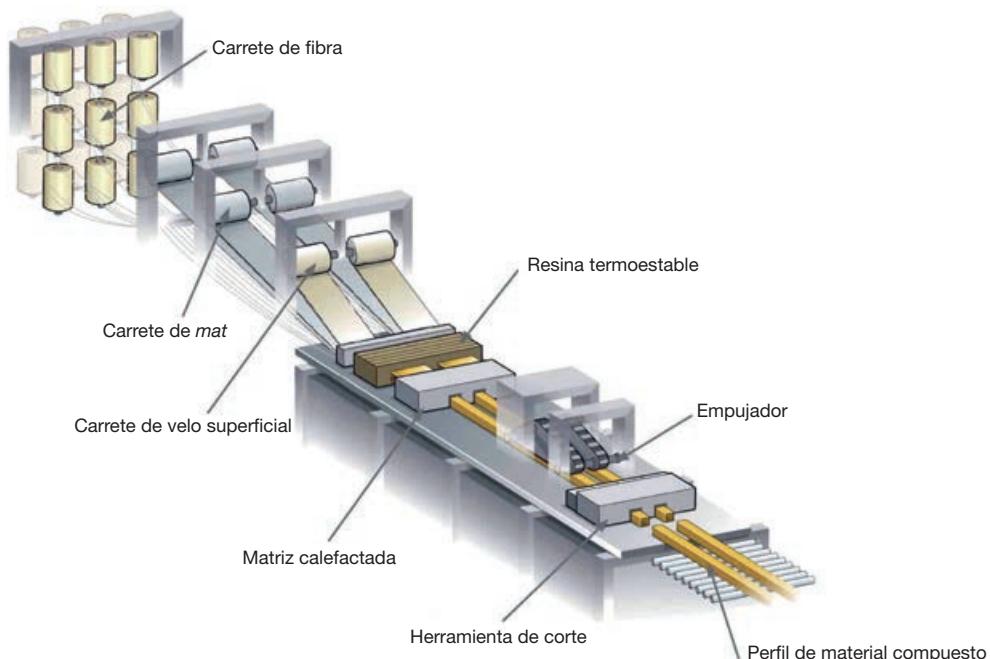
A veces se arrolla la fibra en seco (sin hacerla pasar por el baño de resina) y posteriormente se añade la resina.

■ Figura 25. Proceso de arrollamiento de filamentos



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Esquema del proceso de pultrusión (matriz termoestable)



Fuente: elaboración propia.

## 4.5. Pultrusión

Es un proceso en continuo para la obtención de perfiles de material compuesto, normalmente vigas o tuberías con diversas geometrías del perfil.

Puede usarse tanto para matrices de termoplásticos como para termoestables. En el caso de los termoplásticos, se parte de un preimpregnado en forma de cinta o lámina que se precalienta hasta una temperatura próxima a la de fusión del preimpregnado. A continuación, entra en una matriz que le da forma a la vez que va produciendo el desaireado del preimpregnado, mientras la matriz calefactada hace que la matriz esté por encima de la temperatura de fusión. Posteriormente, el material entra en una zona de la matriz refrigerada, con el objeto de mantener la forma al salir de la matriz.

En el caso de matrices de termoestables, se suele partir de *roving* seco que se sumerge en un baño de resina catalizada, y la mezcla humedecida se hace pasar a través de la matriz, donde el exceso de resina es expulsado. A continuación, pasa a través de la matriz calefactada, donde se produce el curado de la resina. La parte final de la matriz puede estar refrigerada.

## 4.6. Moldeo por transferencia de resina

Es un proceso en el cual se obtienen piezas con superficies bien terminadas por las dos caras, al contrario que en el caso de los procesos de molde abierto, en los que una de las dos superficies tiene un mal acabado.

En el proceso, se introduce el refuerzo con la geometría deseada (o una preforma) y se cierra el molde. Se introduce la resina inyectada en el molde, mientras se hace vacío por el lado contrario del molde para la eliminación de las burbujas. Una vez endurecida la pieza, puede ser extraída del molde.

El proceso permite incluir grandes volúmenes de fibra, obteniéndose una porosidad inferior al 1%, lo que permite obtener piezas con muy buenas características estructurales, con elevada resistencia y rigidez.

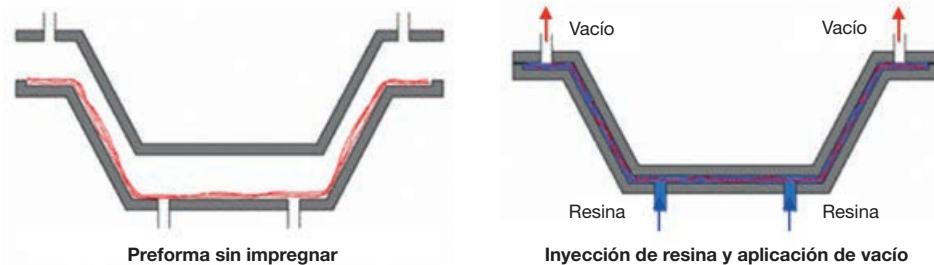
■ Figura 27. Proceso general de moldeo por transferencia



Fuente: elaboración propia.

El proceso se usa cuando se necesitan geometrías avanzadas y crear series medianas o grandes, ya que requiere la fabricación de molde, por ejemplo, para piezas de vehículos. El tiempo por ciclo es medio. El tamaño de la pieza no debe ser grande; se utiliza fundamentalmente para piezas de tamaño pequeño o medio.

■ Figura 28. Moldeo por transferencia



Fuente: elaboración propia.

## Ejercicios voluntarios

1. En la imagen se puede apreciar un prototipo de vehículo de competición en la maratón de bajo consumo (<https://www.shell.com/make-the-future/shell-ecomarathon.html>). Esta prueba consiste en dar 7 vueltas en un circuito a una velocidad mínima de 30 km/h, midiendo el consumo; por extrapolación se obtienen los kilómetros que recorrería el vehículo con un litro de combustible. Los vehículos mostrados en las fotos alcanzaría unos 3100 km con un litro con un motor de 22 cm<sup>3</sup>.



Posición del conductor sobre el carenado inferior y carenado superior desmontado, con una ventanilla delantera y dos ventanillas laterales.

Datos para la fabricación del carenado superior:

- Material compuesto. Matriz: resina epoxi; refuerzo: fibra de carbono.
- Forma aerodinámica.
- Pequeño espesor (entre 3 y 5 mm, aproximadamente).
- Se fija al carenado inferior, con el que coincide en un plano horizontal.

Describir el proceso de fabricación, indicando todos los pasos, equipos, herramientas y materiales necesarios. Realizar los esquemas explicativos.

2. En la imagen se puede ver una raqueta de *squash*. El marco está fabricado con un material compuesto con fibra de carbono. El encordado es de nylon y el mango se recubre con cuero.

Describir el proceso de fabricación, indicando todos los pasos, equipos, herramientas y materiales necesarios. Realizar los esquemas explicativos.



3. Buscar cómo se fabrican los cuadros de las bicicletas de fibra de carbono.



¿Es un proceso automatizado o manual? ¿Qué tipo de fibras se usan? ¿Cómo es la arquitectura del refuerzo? ¿En qué partes se usa cinta unidireccional? ¿En qué otras se usan tejidos? ¿A qué se debe tantas diferencias de precio entre distintos modelos? ¿Qué proceso de conformado se utiliza?

4. Buscar cómo se fabrican los cascos de las embarcaciones de recreo de fibra de vidrio.



¿Es un proceso automatizado o manual? ¿Qué tipo de fibras se usan? ¿Cómo es la arquitectura del refuerzo? ¿Qué proceso de conformado se utiliza?

## Bibliografía

- Besednjak Dietrich, A. (2005). *Materiales compuestos: procesos de fabricación de embarcaciones*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.
- Dawelbeit, A., Hongpeng, Z., Haijuan, K., Jing, L., Yu, M. y Muhuo, Y. (2014). Microstructural Developments of Poly (p-Phenylene Terephthalamide) Fibers During Heat Treatment Process: a Review. *Materials Research*, 17, 1180-1200.
- Hull, D. (1987). *Materiales compuestos*. Editorial Reverte.
- Low, I. M. y Dong, I. (2021). *Composite Materials 1st edition. Manufacturing, Properties and applications*. Elsevier.

- Miracle, D. B. y Donaldson, S. L. (2001). *ASM Handbook, Volume 21: Composites*. ASM International. Materials Park. Ohio.
- Miravete, A. (2012). *Materiales compuestos I*. Editorial Reverté. Barcelona.
- Materiales compuestos II*. Editorial Reverté. Barcelona.
- Rana, S. y Fangueiro, R. (2016). *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering. Processing, Properties and Applications*. Woodhead Publishing Elsevier.
- Reinhart, T. y American Society for Metals International Handbook Committee. (1987). *Engineered Materials Handbook*. Metals Park. Ohio.

