

1. INTRODUCCIÓN

Es probable que la segunda mitad del siglo XX y el siglo XXI sean conocidos como la época de los productos sintéticos, es decir, de los plásticos, las fibras artificiales, los cauchos sintéticos, los materiales compuestos y los adhesivos sintéticos. Desde hace aproximadamente 100 años se ha ido creando una industria masiva que simboliza al siglo XX del mismo modo que el hierro y el acero caracterizaron al siglo XIX.

La baquelita fue el primer polímero completamente sintético, fabricado por primera vez en 1909. Recibió su nombre del de su inventor, el químico estadounidense Leo Baekeland. La baquelita es una resina de fenolformaldehído obtenido de la combinación del fenol (ácido fénico) y el gas formaldehído en presencia de un catalizador; si se permite a la reacción llegar a su término, se obtiene una sustancia bituminosa marrón oscura de escaso valor aparente. Pero Baekeland descubrió, al controlar la reacción y detenerla antes de su término, un material fluido y susceptible de ser vertido en moldes. Si estos últimos eran calentados y sometidos a una determinada presión, se podía obtener un material plástico sólido y pesado; este producto se utiliza hoy en día para algunas aplicaciones de ingeniería. Partiendo de esta primera invención, es posible en nuestros días adaptar y crear nuevos polímeros que pueden ser diseñados para funciones específicas. Se ha desarrollado un tipo de polímeros que no sufren corrosión. Estos sistemas pueden llevarse a cabo para obtener propiedades de rigidez o flexibilidad, transparencia u opacidad, dureza o fragilidad.

Las propiedades de los polímeros sintéticos pueden ser incrementadas en gran medida adaptando técnicas utilizadas por la Naturaleza, tinos pocos materiales naturales consisten en una sola sustancia; la mayoría consisten en una mezcla de componentes diferentes que, al encontrarse unidos, producen un material más capaz de desempeñar su función que una sustancia simple. El hueso, por ejemplo, adquiere su combinación de ligereza y resistencia (o sea, alta resistencia específica) combinando cristales de apatita (un componente del calcio) con fibras de la proteína colágeno. Tales materiales son conocidos como compuestos.

Para aplicaciones civiles/estructurales, en las que tanto la resistencia como la rigidez del material son críticas, es necesario combinar el polímero con otros materiales para obtener materiales compuestos cuyas propiedades superen las de sus constituyentes. El componente más comúnmente utilizado está en forma de partículas o en forma fibrosa. En los primeros, las partículas de un material o materiales específicos están embebidos o adheridos entre sí mediante una matriz continua (el polímero) con un bajo módulo de elasticidad.

En materiales compuestos fibrosos, fibras con alta resistencia y rigidez, están embebidos o adheridos entre sí por la matriz continua de bajo módulo (el polímero). El refuerzo fibroso puede orientarse en la dirección que sea necesaria para proporcionar la mayor resistencia y rigidez y gracias a la moldeabilidad del material pueden seleccionarse las formas estructurales que se consideren más efectivas. Para aumentar todavía más la rigidez del material, las unidades estructurales que forman la estructura completa pueden apilarse de manera que la rigidez de la estructura se deriva tanto de su configuración como del material mismo.

En la industria de la construcción, la fibra de vidrio (o la fibra de carbono o aramida o la combinación de ambas para obtener una fibra híbrida) y el polímero de poliéster (o epoxi) se utilizan para formar un material compuesto fibroso; si las fibras de vidrio y la resina de poliéster se unen para formar un material compuesto, el resultado recibe el nombre de (plástico) poliéster reforzado con vidrio, PRFV, o, más usualmente, polímero reforzado con fibra (PRF). La producción de resinas, catalizadores y aceleradores, con curado a temperatura ambiente, ha facilitado la fabricación de GRP mediante técnicas relativamente directas, utilizando los procesos de molde abierto sin necesidad de emplear prensas o moldes de acero.

La historia de la utilización de polímeros y materiales compuestos para la construcción se inició durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se produjo un rápido progreso con la fabricación de las primeras casetas para equipos de radares electrónicos. También se fabricaron con PRFV algunos elementos de aviones. A finales de la década de los 40 se continuó utilizando el PRFV, pero era un material caro. No obstante, el atractivo del material compuesto por su facilidad para tomar formas complejas en su moldeado, fue reconocido enseguida por los diseñadores y a comienzo de los cincuenta ya se utilizaba para fabricar láminas translúcidas.

El principal crecimiento en interés e investigación con respecto al material compuesto de fibra de vidrio/poliéster para la industria de la edificación y la construcción comenzó en los 60. Los principales procesos, utilizados más frecuentemente para fabricar unidades de paneles grandes y sistemas de placas onduladas son las técnicas de contacto y proyección.

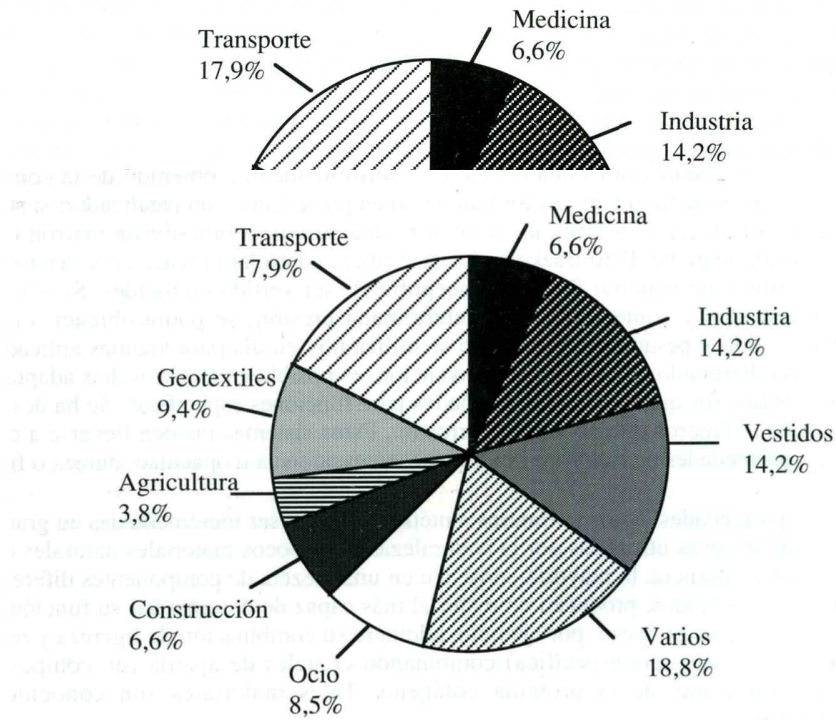


Figura 1.1. Sectores de aplicación de los materiales compuestos.

1.1. ¿Por qué los Nuevos Materiales se utilizan de forma creciente en la Construcción?

Sus características

Los nuevos materiales se caracterizan por su **ligereza**, sus densidades oscilan entre 0.03 y 2 Kg/dm^3 , lo cual aporta enormes ventajas tanto desde el punto de vista de economía y facilidad de **transporte** de la pieza hasta la obra, como del de economía y facilidad de **montaje** y puesta en obra. Sin olvidar la significativa reducción de **cargas muertas** cuando estos materiales se utilizan de modo integral o masivo.

Por otra parte, presentan un excelente comportamiento ante la corrosión y ataque de agentes ambientales, lo cual supone una gran ventaja en aplicaciones costeras, marinas y en general en todos aquellos ambientes que sean agresivos, siendo el mantenimiento prácticamente nulo.

Otra de sus peculiaridades es la de poseer elevadas **propiedades mecánicas** y, en particular, una excelente resistencia mecánica tanto a tracción, como a compresión, flexión, cortadura y resistencia al impacto, lo cual justifica su utilización en la estructura resistente.

Presentan absoluta **libertad** de formas y diseños libres, adaptables a formas tradicionales o imaginativas.

Existe la posibilidad de **moldeo** en grandes piezas, por lo que en ocasiones de difícil ejecución con materiales tradicionales, se puede contemplar su utilización sin ningún tipo de limitaciones desde el punto de vista de proceso de fabricación.

Son autolimpiables por la lluvia, por lo que son muy interesantes para elementos arquitectónicos exteriores como fachadas, cubiertas, elementos decorativos, etc.

No presentan ningún tipo de interferencias a las ondas **electromagnéticas**, lo cual hace que se usen de forma exclusiva para la ejecución integral de edificios de comunicaciones, transmisiones, etc.

Son altamente resistentes al **fuego** ya que presentan una baja inflamabilidad, mediante una selección adecuada de resina y aditivos.

En el capítulo de **seguridad** e higiene, en numerosas aplicaciones en la Construcción, están sustituyendo al amianto: placas onduladas, tabiques antifuego, tubos y accesorios, pizarras de techado y tejas,... Un diseño adecuado del material elimina problemas de humos y de cualquier otro relacionado con la seguridad.

La configuración de sandwich permite obtener un coeficiente de conductividad térmica muy bajo, con lo que se puede afirmar que estos materiales son ideales para resolver el problema de **aislamiento térmico**.

Al ejecutar una pieza en nuevos materiales, existe la posibilidad de **pigmentación** durante el propio proceso de fabricación, lo que se suele denominar "color en masa", siendo innecesaria la operación de pintado de la pieza.

En el capítulo de **acabados**, se pueden conseguir acabados mates, rugosos, satinados,... Asimismo se puede obtener cualquier grado de **luminosidad** de la pieza: translucidez u opacidad.

Estos materiales son inertes al agua y a **agentes químicos** diversos, por lo cual, se están utilizando de forma masiva en instalaciones de almacenaje, distribución y transporte de productos químicos y mercancías peligrosas.

Utilizando los aditivos adecuados, se consiguen altos índices de **aislamiento acústicos**, utilizándose en elementos constructivos interiores como techos y tabiquería

Se puede afirmar que estos materiales prácticamente **no conducen la electricidad**, por lo que se utilizan en instalaciones de almacenaje, distribución y transporte de electricidad con una alta rentabilidad al eliminar total o parcialmente el uso de aisladores.

Como aspectos que limitan su uso, se debe subrayar la **falta de mentalización** entre los usuarios y el escaso conocimiento que de estos materiales se tiene. Al ser tan recientes, los planes de estudios de las diferentes titulaciones no recogen esta materia y se aprecia entre los profesionales una tendencia al uso de materiales tradicionales más conocidos pero probablemente no más convenientes para un elevado número de aplicaciones en la Construcción.

El coste es otro aspecto que en algunos casos limita su utilización, pero es necesario subrayar que mediante un diseño adecuado y tras evaluar las ventajas económicas que conlleva el uso de estos materiales: ligereza, economía de transporte y montaje, reducción de cargas muertas, mantenimiento prácticamente nulo y la eliminación de la operación del pintado de la pieza, se puede afirmar en la gran mayoría de los casos, que el uso de estos materiales es rentable.

Finalmente el **reciclaje** es otro de los temas de candente actualidad entre los nuevos materiales. Para los denominados plásticos o matrices termoplásticas, la reciclabilidad es directa, simplemente calentando la pieza por encima de su punto de fusión, el material está disponible para su uso posterior sin ningún tipo de limitación. Para los nuevos materiales de matriz termoestable, esto no es posible y deben aplicarse tratamientos de tipo mecánico para su reducción en partículas y así permitir su utilización posterior como cargas.

Algunos datos

Si se analiza el mercado de materiales compuestos de acuerdo con los principales sectores usuarios, la industria de construcción ocupa:

- El segundo lugar en Estados Unidos, con 225.000 toneladas, o sea, el 18.6 % (fuente, SPI).
- El cuarto lugar en Europa, con 155.000 toneladas, o sea, el 14.2 % (fuente, Vetrotex).

Esta es una visión instantánea basada en resultados de 1988. Si se analiza el período que va de 1978 hasta 1988 (Figura 1.2) se observan los siguientes resultados:

- El crecimiento total durante este período en el mercado de la construcción fue: 54 % en Estados Unidos, 47 % en Europa.

- La tasa de crecimiento anual fue: + 5.8 % en Estados Unidos, + 2.6 % en Europa.

Estos valores deben ser comparados con el desarrollo del mercado de los materiales compuestos en su totalidad para el período que estamos considerando, durante el cual:

- El crecimiento total fue:
32.5 % en Estados Unidos, 87 % en Europa.

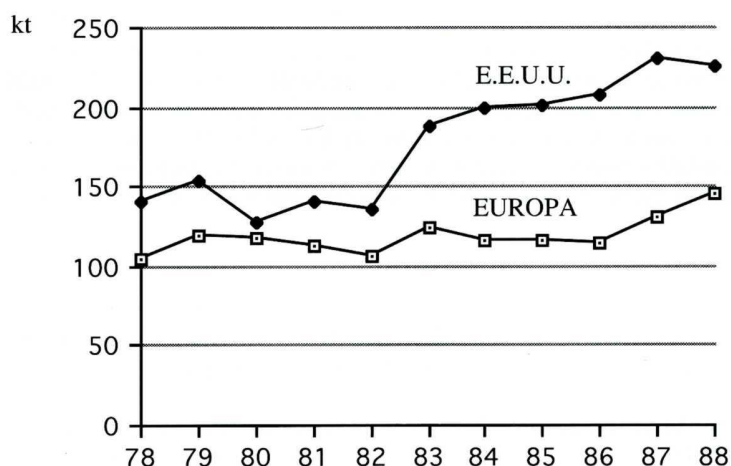


Figura 1.2. Materiales compuestos en la industria de la construcción: E.E.U.U./Europa.

Por lo que nos encontramos con un cuadro más favorable en Estados Unidos que en Europa dado que, en Estados Unidos, las aplicaciones para la construcción crecieron más rápidamente que los materiales compuestos en conjunto, mientras que en Europa sucedió lo contrario.

Lo dicho también se aprecia a partir de las variaciones en la parte del mercado dedicada a los materiales compuestos para la construcción si se compara con el mercado total de materiales compuestos.

Si analizamos el mercado de Europa con más detalle, observamos que los países que utilizan más materiales compuestos en sus industrias de construcción son: Italia, con un 26.8 % del total del mercado de materiales compuestos, y Gran Bretaña (17.1 %). Alemania, Francia y España les siguen con el 16.6, el 14.1 y el 12.2 % respectivamente.

De manera parecida, en la esfera de las aplicaciones, vemos que el mercado de cubiertas de tejados permanece muy estable y que el desarrollo es debido a la aparición de equipamientos sanitarios y unas cuantas nuevas aplicaciones, por ejemplo, cubiertas de paredes externas.

Por tanto, aunque su crecimiento es menos espectacular que el del mercado del automóvil, la industria de la construcción está experimentando una cierta expansión. El conjunto de la profesión tiene la responsabilidad de hacer mayores esfuerzos para penetrar en este importante mercado conservador y todavía no totalmente industrializado.

Un objeto de este libro es examinar los principales tipos de aplicaciones ya existentes para concienciar a los

fabricantes y usuarios de estructuras compuestas basadas en nuevos materiales y, esperamos, a través de ellos, animar el desarrollo del mercado.

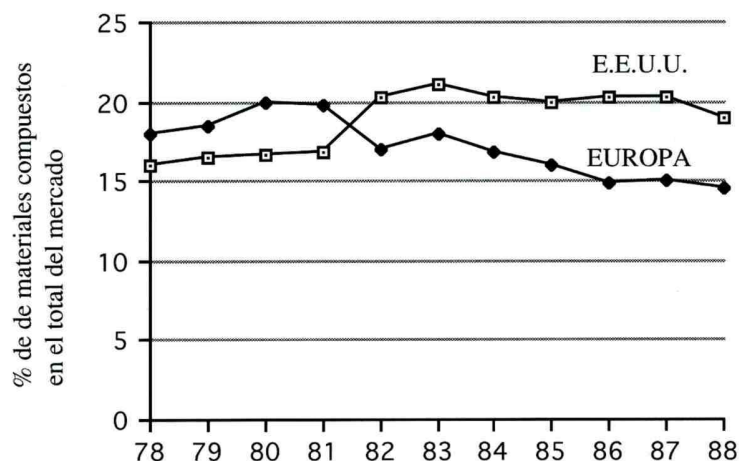


Figura 1.3. Mercado de materiales compuestos en la industria de la construcción: E.E.U.U./Europa.

1.2. Los Nuevos Materiales más representativos en la Construcción

Polímeros termoplásticos

En un polímero termoplástico, la larga cadena de moléculas se mantiene unida por fuerzas de Van der Waals relativamente débiles, pero la valencia química es extremadamente fuerte, por lo que su resistencia y rigidez se derivan de las propiedades inherentes de las unidades del monómero y del elevado peso molecular. Estos polímeros pueden ser amorfos, lo que implica una estructura desordenada con una alta concentración molecular, o pueden ser cristalinos, con un alto grado de orden o alineamiento molecular. En el polímero amorfo, la estructura desordenada puede desenredarse al calentarse y convertirse en un líquido viscoso amorfo. No obstante, es difícil conseguir un polímero con una estructura cristalina pura a causa de la compleja naturaleza física de las cadenas moleculares, por lo que los denominados polímeros "cristalinos" podrían ser descritos con más precisión como polímeros semicristalinos.

Existen muchos polímeros termoplásticos a disposición del ingeniero y cada uno puede ser incluido dentro de grupos específicos que tienen su propia área de uso en la industria de la construcción. Las áreas de subdivisión son:

- geotextiles: polipropileno, polietileno (de baja, alta y extra-alta densidad), modacrílicos, poliamida (nylons), aramidas, poliésteres; los dos primeros polímeros pueden estar en forma de láminas y todos estos polímeros pueden englobarse dentro de las fibras (geosintéticos es un término genérico que se refiere a materiales sintéticos flexibles utilizados en ingeniería geotécnica al igual que las georedes y los geotextiles);
- componentes estructurales de tecnología media en conjunción con refuerzo de fibra: nylons rellenos con fibra;
- componentes estructurales de alta tecnología en conjunción con refuerzos de fibra: polietersulfones y polieteretercetona reforzados con fibra;
- unidades sin carga: PVC, acrílicos;

- (e) unidades con semi-carga: PVC, acrílicos.

Polímeros termoestables

Los polímeros termoestables se fabrican normalmente a partir de precursores líquidos o semi-sólidos que endurecen irreversiblemente; esta reacción química es conocida como policondensación, polimerización o curado y al final del proceso, la resina líquida se convierte en un sólido duro con eslabones químicos en cruz, lo que produce una red tridimensional tirante de cadenas de polímero. Las unidades moleculares que forman la red y la longitud y densidad de los eslabones en cruz de la estructura influirán en las propiedades mecánicas del material; la red y la longitud de las unidades están en función de los productos químicos utilizados y los eslabones en cruz está en función de la temperatura de curado.

El procedimiento de curado es importante para alcanzar las propiedades óptimas del polímero. Muchos termoestables pueden polimerizar a temperatura ambiente pero el material suele ser expuesto a una temperatura relativamente alta en un curado final destinado a minimizar cualquier curado posterior y cambios de propiedades durante la vida en servicio.



Figura 1.4. Hospital General de Cataluña. Fachada realizada íntegramente en materiales compuestos de fibra de vidrio y resina de poliéster (20.000 m²).

Las tensiones de contracción durante el proceso de polimerización, que es una reacción exotérmica, y las tensiones térmicas provocadas por las diferencias entre el coeficiente de expansión térmica de la matriz y la fibra pueden afectar a las microtensiones propias de los materiales compuestos; estas tensiones se añaden a las desarrolladas por la carga externa. Las tensiones producidas por la contracción del polímero pueden ser suficientes para producir microfisuras incluso en ausencia de carga externa.

La principal resina termoestable utilizada en la industria de la construcción es la resina de poliéster y tres tipos de ella se utilizan como resina de laminación: el tipo ortoftálico es una resina de utilización general, la isoftálica tiene propiedades de resistencia superiores al desgaste y a los agentes químicos y el tipo de ácido caliente se utiliza como retardador de llama. Pueden utilizarse en las resinas rellenos y pigmentos, el primero principalmente para mejorar las propiedades mecánicas y el segundo para mejorar la apariencia y la protección. Los rellenos como el trihidrato de aluminio pueden ser utilizados para mejorar las características retardadoras de llama, pero es importante que se incorpore la cantidad correcta: si se utiliza en una proporción muy alta, pueden aparecer efectos adversos para las propiedades contra el desgaste. Esto sólo es aplicable a materiales compuestos expuestos al aire libre; para aplicaciones

internas, donde el agua o los agentes químicos no están en contacto con el polímero, éste no resulta afectado. Los estabilizadores de ultravioletas pueden incorporarse a la resina en el momento de la fabricación y puede aplicarse al material compuesto un revestimiento de superficie de gel coat para incrementar la protección contra el desgaste.

La resina epoxi es otra de las resinas termoestables que se utilizan en la industria de la construcción, si bien, en comparación con la resina de poliéster tiene un limitado pero muy especializado uso. La dureza de los epoxis es superior a la de las resinas de poliéster y, por ello, pueden operar a temperaturas más altas. Tiene buena adherencia a muchos sustratos, baja contracción durante la polimerización y son especialmente resistentes a los ataques de álcali. Esto permite moldes de alta calidad y con buena tolerancia dimensional.

Las resinas epoxídicas más importantes son oligómeros, fabricados a partir de la reacción del bisfenol A y la epíclorohidrina y se obtienen a partir de líquidos de viscosidad media en sólidos de alta fusión. Las diferentes resinas se forman variando las proporciones de las dos reacciones.

Polímeros espumados

La espuma de polímero rígido es el nombre más corrientemente utilizado para describir el sistema de dos fases de un gas dispersado en un polímero sólido. En muchos casos el polímero representa solamente una porción menor del volumen del sistema pero contribuye en gran medida a sus propiedades y utilidad. Los polímeros espumados se fabrican añadiendo un agente dilatador a las formulaciones químicas que causa la expansión del material y el aumento de su volumen inicial mediante la formación de pequeñas celdillas. Las propiedades de las espumas y el mejor uso de dichas propiedades es un tema complicado, influido no sólo por las propiedades del polímero sino también por el método de manufactura. Una caracterización completa de la estructura de la espuma requeriría el conocimiento del tamaño y la localización espacial de las celdillas pero es difícil de conseguir y el tema todavía no ha sido totalmente investigado.

Como los polímeros sólidos, las espumas de polímero rígido pueden ser materiales termoplásticos o termoestables y comparten las ventajas y limitaciones de la fase sólida: además, la densidad, la geometría de las celdillas y la composición de la fase gaseosa pueden ser variadas para modificar los productos.

Elastómeros

Otros miembros de la familia de los polímeros son los elastómeros, siendo el más común el caucho. El material consiste en moléculas de cadena larga enrolladas y retorcidas de manera desordenada cuya flexibilidad molecular es tal, que el material es capaz de resistir deformaciones considerables. Si el material no ha sido curado mediante el proceso llamado vulcanización, el elastómero no se recuperará completamente de grandes deformaciones recibidas bajo carga: esto es debido a que las moléculas pueden haberse movido irreversiblemente las unas con respecto a las otras. Después del proceso de curado, las moléculas tienen eslabones en cruz y, como un polímero termoestable, no se desplazan las unas con respecto a las otras bajo carga. Como el proceso de vulcanización no cambia la forma de las moléculas enrolladas, pero previene posibles desplazamientos, el material elastomérico puede recuperar totalmente su forma original tras ser sometido a una fuerza.

Esquema de nuevos materiales

FIBRAS

- Fibras de vidrio A, B, C, D, ERG, R, S y X
- Fibras de carbono
- Fibras de aramida
- Fibras sintéticas
- Fibras para pretensado de tendones para hormigón
- Fibras para arquitectura textil

MATRICES

- Matrices termoestables Resina fenólica Resina de

viniléster Resina de epoxi Resina de poliéster

Matrices termoplásticas

Policloruro de vinilo (PVC) Polietileno (PE)
Polipropileno (PP) Poliestireno (PS)
Copolímeros de estireno (ABS, SAN) Esteres de celulosa
Polimetacrilato de metilo (PMMA) Poliamidas (PA)
Polioximetileno (POM) Poliésteres termoplásticos Policarbonato
(PC) Termoplásticos fluorados

NÚCLEOS

Nidos de abeja

Polipropileno
Nomex
Aluminio

Espumas

Poliuretano Policloruro de vinilo Poliestireno

ELASTOMEROS

1.2.1 Fibras

Fibra de vidrio

La historia de la fibra de vidrio se remonta a la época de los Egipcios, quienes descubrieron sus virtudes de resistencia para armar vasos y ánforas en las tumbas de los faraones. Las fibras tejidas datan del siglo XVIII en Francia y la producción de fibra de vidrio continua se consiguió en 1938 en Estados Unidos, creándose la compañía Owens-Corning Fiberglass.

La fibra de vidrio está elaborada a partir de las materias primas tradicionales necesarias para la fabricación del vidrio: sílice, cal, alúmina y magnesita. A estos constituyentes de base se añaden, según los tipos de vidrio, dosis extremadamente precisas de ciertos óxidos. El conjunto se llama "composición". Triturada finamente y amasada para conseguir una mezcla homogénea, introducida después en un horno de fusión, la composición pasa progresivamente al estado líquido. La temperatura del horno se sitúa alrededor de 1550° C.

A continuación, el vidrio en fusión alimenta las hileras. Mantenido a 1250° C, el vidrio se cuela por gravedad a través de placas con aleación de platino y rodio perforadas por varios centenares de orificios de uno o dos milímetros de diámetro. A la salida de las hileras, los hilos de vidrio son estirados mecánicamente a gran velocidad para dar unos filamentos de 5 a 24 mieras según las aplicaciones que se les quiera dar.

Inmediatamente después y antes de reunirse para formar el hilo de base, los filamentos son revestidos de una dispersión acuosa de compuestos, generalmente orgánicos, llamada ensimaje, que asegura la unión entre los filamentos y la protección del hilo contra la abrasión, todo ello confiriéndole las propiedades indispensables para transformaciones futuras.

Los hilos destinados al refuerzo de resina reciben un ensimaje plástico que contiene productos filmógenos pegables, antiestáticos, plastificantes y agentes de puente que permiten obtener muy buenas características de puesta en servicio o moldeado, y asegurar una buena compatibilidad vidrio-resina. Los hilos destinados a transformaciones puramente textiles reciben un ensimaje textil, compuesto de agentes suavizantes, pegantes y lubricantes que le confieren el deslizamiento y la resistencia necesarios a la abrasión.

El hilo de vidrio entra seguidamente en la parte final de su transformación, la del acabado: textil o plástico.

Los tipos de vidrio utilizados como fibras son:

- Vidrio A: de alto contenido en sílice, se utiliza como reforzante y posee gran resistencia química.

- Vidrio B: de excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad. Es borosilicato de calcio de bajo contenido e álcali.
- Vidrio ERC: con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química.
- Vidrio S: es el más caro. Posee alta resistencia a la tracción y estabilidad térmica y se utiliza en la construcción aeronáutica.
- Vidrio C: de alta resistencia química.
- Vidrio R: de alta resistencia mecánica y módulo de elasticidad.
- Vidrio D: de alto coeficiente dieléctrico.
- Vidrio X: con base de Li_2CO_3 por su transparencia a Rayos X.

El vidrio en los PRFV es usado de diferentes formas, como:

- Tejido: para conseguir resistencia en dos direcciones.
- Mat: fieltro de hilos continuos o troceados mantenidos por un ligante particularmente adaptado al molde.
- Roving: consiste en hilos continuos formando una hebra principalmente utilizada en la técnica de Filament Winding.

Fibra de vidrio para hormigones o morteros: las fibras de vidrio AR

La fibra de vidrio AR es una fibra de alto módulo (10 veces más resistente que el polipropileno) con una gran resistencia a la tracción (de 3 a 4 veces la del acero). Es pues una fibra ideal para reforzar las matrices de cemento.



Figura 1.5. Fachada de edificio realizada en hormigón reforzado con fibra de vidrio AR.

Cuando son incorporadas a una mezcla cemento/arena, resulta un material ligero y similar al hormigón, con las siguientes propiedades:

- Aptitud para reproducir detalles de superficie - ideal para imitar piedra o pizarra.
- Ligero - lo que reduce costos de transporte y puesta en obra e instalación
- Aptitud para ser moldeado en formas complejas - especialmente útil para la renovación o la restauración de inmuebles.
- Gran resistencia contra la propagación de fisuras.
- Reduce la carga en los edificios - lo que conduce a una reducción de los costes de estructura y cimentación.

- Reduce los cuidados de mantenimiento y posee excelente resistencia al vandalismo.

Formulaciones tipo:

La fibra de vidrio AR se utiliza generalmente en tasas del 3 al 5% para la fabricación, en factoría, de productos acabados de forma prefabricada, bien sea por proceso de proyección o bien sea mediante la utilización de los métodos tradicionales del colado del hormigón.

La fibra de vidrio AR es usada también en tasas del 1 al 2% para reforzar los revocos directamente en obra y del mismo modo para controlar la retracción, la microfisuración y las subidas del agua del hormigón colado en la obra.

Para los productos prefabricados, las formulaciones tipo son las siguientes:

Materias primas	Proyección(kg)	Colado/Vibrado(Kg)
Cemento	36	36
Agregados finos	36	36
Plastificante	0,5	0,5
Polímero	10	10
Vidrio AR	5	3
Agua	12	14

Procedimientos de fabricación:

Las piezas de fibra de vidrio AR pueden ser fabricadas por medio de numerosas técnicas de producción como:

- Proyección manual- una técnica muy versátil para producción de compuestos de naturaleza simple o compleja, con una gran resistencia.
- Proyección automática en vaivén para la producción en serie de compuestos estándar.
- Proyección robotizada para obtener una gran productividad en la fabricación de paneles arquitectónicos complejos.
- Producción colado/vibrado para pequeños elementos arquitectónicos.
- Sistema de extrusión para la producción en serie de elementos lineales perfilados.
- Inyección en moldes.
- Aplicaciones en obra utilizando mezclas secas embaladas en sacos.

Dada la combinación original de sus propiedades, las fibras de vidrio AR son utilizadas actualmente en el mundo entero para numerosas aplicaciones como:

FACHADAS

- Paneles arquitectónicos
- Sistemas de construcción
- Placas de recubrimiento en obra

INGENIERÍA CIVIL

- Encofrados de tableros de puentes y parapetos
- Muros anti-ruido
- Renovación de alcantarillados
- Sistemas de transporte de aguas y canales

MOLDEADOS ARQUITECTÓNICOS

- Capiteles y columnas
- Ménsulas y cornisas

- Pórticos
- Barandillas

EN SUSTITUCIÓN DEL AMIANTO

Fibra de carbono

Las fibras de carbono se fabrican mediante pirólisis controlada y ciclización de precursores de cierta fibra orgánica, el más común de los cuales es el precursor poliacrilonitrilo (PAN) y el precursor MPP; el primero es una fibra sintética y el segundo se obtiene de la destilación destructiva del carbón.

El proceso de fabricación de fibra de carbono consiste en una secuencia de procedimientos: estabilización, carbonización, grafitización y tratamiento de superficie. En el primer paso de la fabricación de la fibra de PAN (estabilización), un filamento de copolímero de poliacrilonitrilo (PAN) es estirado y pasado a través de un horno de oxidación a baja temperatura para adquirir estabilidad dimensional. Este paso suele denominarse infusible. En el siguiente paso de carbonización la estructura interna del polímero se convierte a una alta temperatura más alta (800° C bajo una atmósfera inerte) en lazos de anillos hexagonales de carbono continuo. Durante el período de calentamiento, muchos elementos diferentes del carbono desaparecen y los cristales de carbono se orientan a lo largo de toda la longitud de la fibra. En el siguiente tratamiento de calentamiento a más altas temperaturas, por encima de 2000° C (grafitización), el tamaño de los cristales de carbono aumenta y mejora la orientación de los cristales de la fibra. Finalmente, la fibra pasa a través de una cámara de tratamiento de superficie para mejorar la adhesión de la fibra. Los pasos de procesamiento para la fibra base son similares, salvo en el paso inicial, en el que la fibra se derrite en forma de masa a partir de hilos procesados isotrópicos o anisotrópicos. El tamaño y orientación de los cristales, la porosidad de la fibra y su impureza son los principales factores que afectan a las propiedades físicas finales del filamento.

Los filamentos de fibra de carbono tienen un diámetro típico que oscila entre 5 y 8 μm y están combinados en mechas que contienen 5000 y 12000 filamentos. Estas mechas pueden retorcerse en hilos y formar tejidos parecidos a los de la fibra de vidrio. También se encuentran en el mercado tejidos híbridos conteniendo fibras de vidrio y carbono.

Cuando el tratamiento de calentamiento para la fibra de carbono aumenta, el módulo de elasticidad crece exponencialmente a lo largo de todo el rango de temperatura; el motivo para esto es que la cristalinidad de la fibra aumenta hasta un valor máximo hacia los 1600°C y entonces cae hasta un valor constante, mientras la temperatura sube hasta el valor más alto utilizado. A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de fibra de carbono:

1. La fibra de carbono Tipo 1 es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.
2. La Tipo 2 es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia tensil.
3. La Tipo 3 es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la resistencia es buena. Este tipo tiene la temperatura más baja en el tratamiento.

Aunque corrientemente las fibras de carbono tienden a ser utilizadas sobre todo para aplicaciones aeronáuticas y espaciales, han sido tenidas en cuenta para ser utilizadas en la industria de la construcción. Una fibra de carbono de alto módulo (HM20) fabricada a partir de un hilo de petróleo de cristal líquido recientemente desarrollado por Petoca, en Japón, tiene módulos de elasticidad y valores de resistencia de 200 GPa y 2000 MPa respectivamente; su coste es comparable al de la fibra de vidrio. Pueden utilizarse unidos a polímeros o a matrices de cemento.

Fibra de aramida

Las fibras de aramida son unas fibras orgánicas y sintéticas que tienen un alto grado de cristalinidad; tienen aplicaciones en el campo de los materiales compuestos. Las cadenas moleculares son alineadas y rigidizadas mediante anillos aromáticos con uniones de hidrógeno. Esta combinación explica su altísima resistencia. Existen dos grados de rigidez: uno tiene un módulo de elasticidad en el rango de 60 GPa y el otro tiene un módulo de elasticidad de 130 GPa. La fibra de más alto módulo es la que se utiliza en materiales compuestos de matriz termoestable.

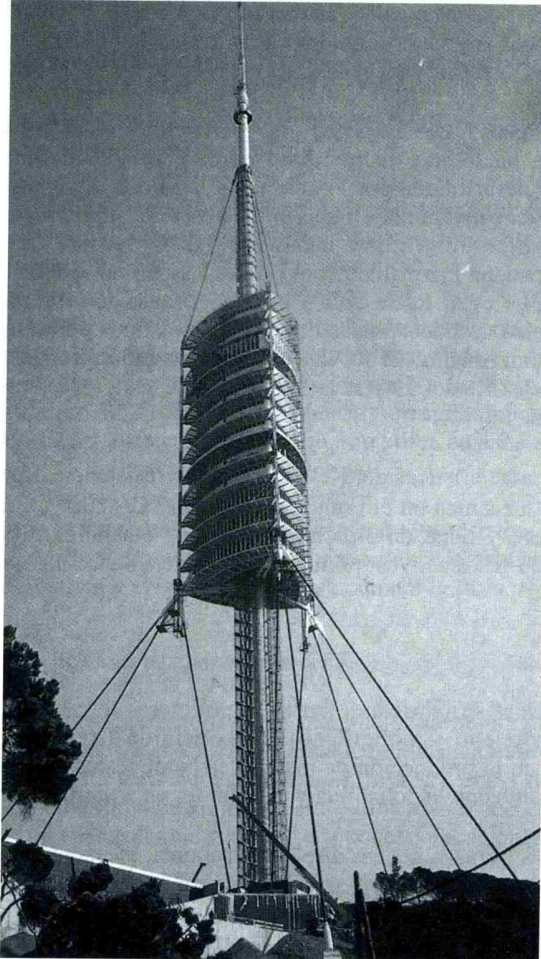


Figura 1.6. Torre de comunicaciones de Collserola, Barcelona, cuyos tirantes superiores están realizados con fibra de aramida.

La fibra se fabrica normalmente mediante un proceso de extrusión e hilado. Una solución del polímero en un solvente adecuado a una temperatura entre -50°C y -80°C es sometido a extrusión en un cilindro caliente que está a 200°C ; esto provoca la evaporación del solvente y la fibra resultante es enrollada en una bobina. La fibra, entonces, es sometida a un proceso de estiramiento para aumentar sus propiedades de resistencia y rigidez.

Existen distintos tipos de fibras de aramida, incluido el kevlar, aramida que se fabrica en diferentes versiones por Du Pont en USA e Irlanda del Norte, el twaron, que es producido por Enka en Holanda y technora, que es fabricada en Teijin, Japón.

Es un grupo relativamente nuevo y potencialmente importante de fibras basado en la alta resistencia y rigidez que es posible obtener en polímeros completamente alineados. Son poliamidas con radicales aromáticos, unidos los radicales de bencilo, resultando unas fibras mucho más resistentes, térmica y mecánicamente.

Las cuatro principales fibras aramidadas son: Kevlar RI, Kevlar 29, Kevlar 49 y Nomex. El Kevlar es la que ha tenido mayor éxito comercial. Fue descubierta en 1965 por Stephanie Kwolek y desarrollada por la compañía Du Pont. Es una poliamida aromática llamada poliparafenileno tereftalamida con una estructura química perfectamente

regular cuyos anillos aromáticos dan como resultado las moléculas del polímero con las propiedades de una cadena razonablemente rígida. Las fibras se fabrican por procesos de extrusión e hilado. El Kevlar RI se aplica para el cordaje de refuerzo de neumáticos, el Kevlar 29 se utiliza para vestidos, paracaídas, cuerdas y cables y tiene una alta resistencia y un módulo elástico intermedio. El Kevlar 49 tiene un módulo elástico superior pero la misma resistencia que el Kevlar 29 y es la fibra preferida para los materiales compuestos de elevadas prestaciones.

Las principales características del Kevlar son: gran resistencia específica a la tracción, ligereza, estabilidad mecánica en el rango térmico $-30^{\circ}\text{C}/+200^{\circ}\text{C}$. Es cinco veces más resistente que el acero y tiene un altísimo módulo de elasticidad (baja elongación a la rotura) y no es atacado por reactivos químicos a diferencia de los metales.

La fibra se fabrica normalmente mediante un proceso de extrusión e hilado. Una solución del polímero en un solvente adecuado a una temperatura entre -50°C y -80°C es sometido a extrusión en un cilindro caliente que está a 200°C ; esto provoca la evaporación del solvente y la fibra resultante es enrollada en una bobina. La fibra, entonces, es sometida a un proceso de estiramiento para aumentar sus propiedades de resistencia y rigidez.

Existen distintos tipos de fibras de aramida, incluido el kevlar, aramida que se fabrica en diferentes versiones por Du Pont en USA e Irlanda del Norte, el twaron, que es producido por Enka en Holanda y technora, que es fabricada en Teijin, Japón.

Es un grupo relativamente nuevo y potencialmente importante de fibras basado en la alta resistencia y rigidez que es posible obtener en polímeros completamente alineados. Son poliamidas con radicales aromáticos, unidos los radicales de bencilo, resultando unas fibras mucho más resistentes, térmica y mecánicamente.

Las cuatro principales fibras aramidadas son: Kevlar RI, Kevlar 29, Kevlar 49 y Nomex. El Kevlar es la que ha tenido mayor éxito comercial. Fue descubierta en 1965 por Stephanie Kwolek y desarrollada por la compañía Du Pont. Es una poliamida aromática llamada poliparafenileno tereftalamida con una estructura química perfectamente regular cuyos anillos aromáticos dan como resultado las moléculas del polímero con las propiedades de una cadena razonablemente rígida. Las fibras se fabrican por procesos de extrusión e hilado. El Kevlar RI se aplica para el cordaje de refuerzo de neumáticos, el Kevlar 29 se utiliza para vestidos, paracaídas, cuerdas y cables y tiene una alta resistencia y un módulo elástico intermedio. El Kevlar 49 tiene un módulo elástico superior pero la misma resistencia que el Kevlar 29 y es la fibra preferida para los materiales compuestos de elevadas prestaciones.

Las principales características del Kevlar son: gran resistencia específica a la tracción, ligereza, estabilidad mecánica en el rango térmico $-30^{\circ}\text{C}/+200^{\circ}\text{C}$. Es cinco veces más resistente que el acero y tiene un altísimo módulo de elasticidad (baja elongación a la rotura) y no es atacado por reactivos químicos a diferencia de los metales.

Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas se fabrican a partir de polímeros termoplásticos tales como las poliolefinas (polipropileno y polietileno), la poliamida (nylon) y el poliéster. Las poliolefinas se usan en la producción de materiales compuestos cemento/mortero, aunque también se utilizan junto con la poliamida y el poliéster en materiales geosintéticos.

Es posible que las fibras sintéticas diseñadas química, mecánica y físicamente consigan los requerimientos particulares para aplicaciones en ingeniería geotécnica. Las fibras naturales, como el algodón, el yute, y la mayoría de aquellas reproducidas, como la celulosa y el rayón, son poco usadas para fabricar materiales geotextiles ya que son biodegradables. Sin embargo, estas fibras pueden ser utilizadas para situaciones eventuales en las que la biodegradación sea deseable.

El principal interés industrial en el uso de fibras sintéticas radica en el campo de suelos reforzados con las posibilidades que presentan los geotextiles. Estos sistemas poseen un número de características intrínsecas que los hacen ideales para aplicaciones de refuerzo de suelos. Están compuestos de polímeros termoplásticos altamente estables y duraderos (poliolefinas y fibras de poliéster de alto módulo) que están diseñados para proporcionar las propiedades mecánicas requeridas (p.e. resistencia a tracción y extensión) y la forma; el último proporciona formas geométricas específicas que optimizan las características de "adhesión" entre los geotextiles y el suelo.

Los geotextiles se pueden dividir en dos categorías:

(a) geotextiles convencionales tejidos, no tejidos, mallados y cosidos

(b) geotextiles especiales que no tiene origen textil y que incluyen materiales geogrids, geotrips, geobars y geocomposites.

Los geotextiles no tejidos consisten en una ordenación al azar de fibras pegadas por calor o por punzada de aguja. Las fibras pueden estar en forma de filamentos cortados (corta longitud) ó continuos.

Los geotextiles tejidos consisten en fibras ordenadas en forma ortogonal en varias configuraciones. Los tejidos monofilamentos se fabrican a partir de fibras con sección transversal circular o elíptica y los tejidos multifilamentos (y fibrilares) se fabrican a partir de fibras que se juntan en filas paralelas dispuestas ortogonalmente. Los geotextiles mallados consisten en fibras entrecruzadas y los geotextiles cosidos se fabrican cosiendo hilos de fibra.

Los geocomposites se fabrican colocando fibras de alta resistencia en una lámina de material polímero. Así el componente de fibra proporciona la propiedad de tracción y el polímero la forma geométrica y el medio de protección para la fibra.

Fibras para pretensado de tendones para hormigón

Existen dos fibras con base polimérica y un material de fibra inorgánica cuyo uso como cable es apropiado para pretensar el hormigón armado; estos materiales pueden reemplazar a los cables de acero de alta resistencia a tracción. Son las fibras de vidrio, aramida y carbono. Los dos primeros tipos de fibra han sido utilizados como cables para pretensar mientras que la última es aprovechable pero no se conocen aplicaciones reales.

Los tres sistemas comerciales utilizan filamentos paralelos pero difieren en las técnicas de construcción. El "Polystal" es una pultrusión de fibra de vidrio en un material resinoso; "Parafil" es una cuerda cuya resistencia proviene de hilos de aramida; "Arapree" es una pultrusión de fibras de aramida.

1. Polystal está producido por Bayer AG en asociación con Strabag AG de Alemania y está disponible desde 1978. El cable consiste en haces de varillas, cada una de las cuales contiene fibras de filamentos de vidrio E en una resina de poliéster no saturado. El módulo de elasticidad de las varillas de Polystal es 51 GPa y tiene una característica tensión-deformación lineal a rotura de 1520 MPa; la resistencia a rotura es 3.3%.

2. Parafil es una cuerda que contiene un núcleo de fibra alineada unidireccionalmente que está encapsulada en un encofrado de material polímero. Frecuentemente se usan fibras de Poliéster, Kevlar 29 y Kevlar 49 en forma de cuerda y se conocen como Tipo A, Tipo F y Tipo G, respectivamente. La

sustitución de cables de acero por cables de Parafil puede ser una opción de gran futuro. Las cuerdas han sido usadas como cables para pretensar en hormigón armado pretensado. Los ensayos han permitido a los ingenieros predecir que una cuerda de Parafil puede sostener una carga de un 50% de la resistencia última a corto plazo durante 100 años y que aplicando un factor material de 1.5 a este nivel de carga se consigue una tensión de trabajo que se mantiene en aproximadamente 650 MPa.

3. Arapree es un cable pretensado que consiste en filamentos de aramida embebidos en una resina epoxi y realizados mediante la técnica de pultrusión, usando la fibra de aramida Twaron. El cable fue desarrollado por AKZO en asociación con Hollandsche Betón Group (HBG).

Pueden encontrarse los típicos cables en forma de listón en secciones de 20 mm. de anchura y 1.5 mm. de espesor, con unas resistencias a tracción de 34 kN.

Puede esperarse un uso económico a largo plazo de estos cables aramida/epoxi para refuerzos y pretensado en lugares donde:

- el cemento esté expuesto a un ataque atmosférico agresivo
- estén presentes los cloruros (agua de mar; sales anti-escarcha)

- el uso de cloruro de calcio en la matriz del cemento pueda aumentar la productividad
- se requieran elementos delgados y ligeros
- se requiera una gran capacidad de deformación (impactos, explosiones, terremotos) y donde se deben conseguir requerimientos para fatiga elevada
- se deban prevenir corrientes electromagnéticas

Para un uso práctico de cables de pretensado en estructuras de hormigón, se deben considerar los siguientes aspectos a largo plazo:

- comportamiento deformación/relajación
- comportamiento en diferentes condiciones ambientales (p.e. alcalina y carbonatada)
- comportamiento tensión de rotura/tensión de corrosión
- resistencia residual bajo carga sostenida
- datos de fatiga y fatiga en la unión

Fibras para arquitectura textil

Además de la fibra de vidrio ya mencionada, se utilizan en arquitectura textil, las fibras de poliéster que se combinan con una matriz termoplástica, normalmente policloruro de vinilo.

1.2.2. Matrices

Matrices termoestables

Resinas fenólicas

Se denomina resina fenólica al polímero resultante de la reacción de un fenol y un aldehído. Estas resinas se preparan a partir del fenol, cresol o xilenol y del aldehído fórmico.

Las reacciones conducen a un producto duro, insoluble e infusible y sobre ellas existen numerosas teorías, pero las podemos esquematizar en las dos etapas siguientes:

1. Reacción de adición

En ellas las moléculas de aldehído reaccionan con el fenol, pudiendo adicionarse hasta tres moléculas de formol con una de fenol.

2. Reacción de condensación

Esta reacción de condensación es más o menos rápida según el pH del medio de reacción.

Las resinas utilizadas para el moldeo son prepolímeros solubles y fusibles, intermedios de la etapa de condensación, es decir que la reacción es detenida en un estado determinado.

En medio alcalino la reacción de condensación es lenta, así que trabajando con pH básico se puede limitar esta reacción a la formación de prepolímeros llamados Resoles.

En medio ácido la reacción es extremadamente rápida y para controlarla se debe trabajar con un exceso de fenol con relación al formol, obteniendo entonces un prepolímero llamado Novolaca.

El endurecimiento durante el moldeo se obtendrá volviendo a acelerar la reacción de condensación que fue frenado en un estado intermedio.

Las resinas fenólicas, que fueron las primeras termoendurecibles utilizadas a escala industrial, se utilizan

generalmente con cargas o refuerzos cuya elección se hace en función de las propiedades o aplicaciones requeridas.

Las principales propiedades de los materiales compuestos a base de resinas fenólicas son las siguientes:

- Excelentes características eléctricas.
- Buena resistencia a temperaturas elevadas.
- Muy buena resistencia al fuego.
- Resistencia al choque.
- Resistencia a la abrasión.
- Buena resistencia al ataque químico y, de forma especial, al de los disolventes orgánicos.
- Excelente adhesión a otras resinas (epoxi, urea-formol, etc.).
- Estabilidad dimensional.

Si bien desde el punto de vista químico hay dos grandes grupos de resinas fenólicas (novolacas y resoles), en el campo de los materiales compuestos, se pueden hacer también dos grandes clasificaciones:

- Según su presentación ante el moldeo:
 - Polvos de moldeo.
 - Resinas en solución en un disolvente orgánico.
 - Resinas líquidas, con un cierto porcentaje de agua.
- Según la técnica de moldeo:
 - Moldeo a alta y media presión.
 - Moldeo a baja presión.

Los polvos de moldeo, especialmente los que son novolacas, sólo se utilizan en el moldeo a alta presión.

Las resinas en solución, sean novolacas o resoles, se utilizan principalmente para la fabricación de preimpregnados que son moldeados a media o baja presión.

Resinas viniléster

Las resinas termoendurecibles viniléster son relativamente recientes y están llamadas a tener un gran desarrollo, a pesar de su precio elevado, 1.5 a 2 veces superior al de las poliéster clásicas.

Las resinas son el resultado de una poliadición de resina epoxi sobre el ácido insaturado acrílico o metacrílico.

Se presenta en disolución con un 30-40% de monómero reactivo, generalmente estireno y se utilizan de la misma forma que las resinas de poliéster con los mismos aceleradores y catalizadores.

Las principales características de este grupo de resinas son:

- Buenas cualidades mecánicas y, de forma particular, excelente resistencia a la fatiga.
- Excelente fluidez, que facilita su impregnabilidad y moldeo.

Buena adhesión sobre las fibras de refuerzo, debido a los grupos hidroxilos sobre las ramificaciones de la cadena.

Resistente a la corrosión, incluso en agua caliente.

Buena resistencia al fuego, que se puede mejorar por modificación de la molécula viniléster mediante átomos de cloro o bromo, obteniendo resinas autoextinguibles.

Resinas epoxi

Las resinas epoxi son termoendurecibles que contienen en su molécula dos o varias funciones epoxídicas o glicídicas.

La resina epoxi más típica es el diglicidiléster del bisfenol A (DGEBA), que es la más antigua y todavía la más utilizada.

Sin embargo, hoy en día los poliepóxidos abarcan un conjunto de resinas basadas en numerosos compuestos distintos del bisfenol A, lo que permite abrir el campo a muy diversas aplicaciones.

En general, las resinas epoxi se presentan en forma líquida más o menos viscosa que puede transformarse en material sólido infusible mediante la acción de endurecedores apropiados. Estos endurecedores pueden ser de dos tipos:

1. Compuestos que contienen funciones capaces de agregarse al ciclo epóxido durante el proceso de moldeo (endurecedores co-reactivos). Se trata de aminas primarias o secundarias, anhídridos de ácidos o de derivados de la guanidina y se utilizan en proporciones estequiometrías definidas, necesitando aporte térmico durante la transformación.
2. Compuestos que desencadenan la copolimerización de las resinas (endurecedores catalíticos), que son generalmente ácidos o bases de Lewis.

Las resinas epoxi presentan en general las siguientes propiedades específicas:

- Baja retracción.
- Buen comportamiento a temperatura elevada, hasta 180° C.
- Buena resistencia a los agentes químicos.

Resinas de poliéster

Son compuestos obtenidos por policondensación de uno o varios glicoles con uno o varios diácidos en los que por lo menos uno de ellos contiene el doble enlace etilénico.

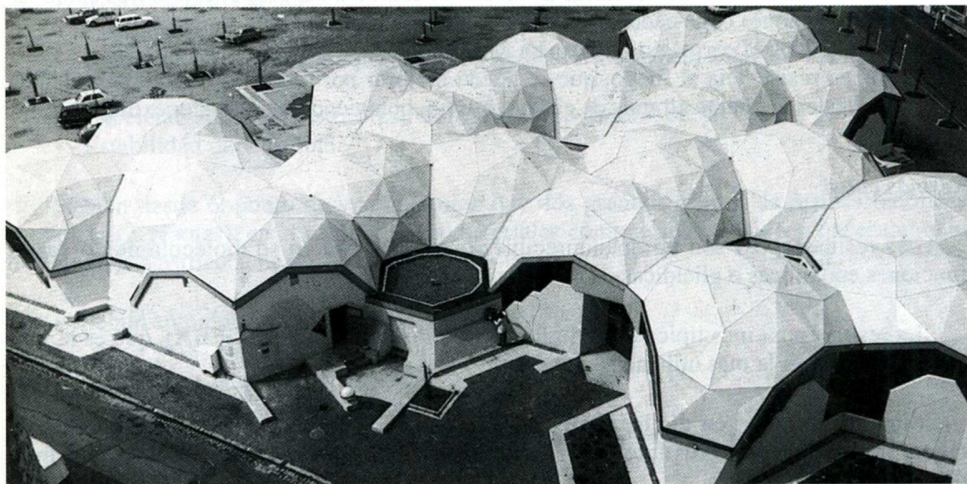


Figura 1.7. Estructura integral de Halle maraichère en Francia realizada en resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio.

En la práctica, la resina poliéster insaturada se obtiene por policondensación del anhídrido maléico, anhídrido itálico y polipropilenglicol. El polímero obtenido es disuelto en estireno. Esta solución puede copolimerizar bajo la acción de radicales libres o por el calor.

Para el suministro a los usuarios, la mezcla se estabiliza con inhibidores (hidro equinona).

La copolimerización conduce al endurecimiento y se realiza sin eliminación de productos secundarios y sin necesidad de presiones ni de temperaturas elevadas.

La aptitud de la resina para impregnar con facilidad las fibras de vidrio permite la obtención de materiales cuyas características mecánicas y ligereza son muy interesantes con relación a los materiales tradicionales, y han permitido el desarrollo de resinas poliésteres insaturadas en muy numerosas aplicaciones.

La configuración y la composición química de la resina poliéster endurecida determinan sus características y sus propiedades (flexibilidad, dureza, resistencia mecánica, química, térmica, etc.).

Estas características se derivan de los siguientes parámetros:

- Naturaleza de los constituyentes de base, dialcoholes y diácidos.

- Alifático o aromático.
- Número de carbonos.
- Número de grupos éteres.
- Isómero.

- Proporciones relativas de los constituyentes.

- Grado de insaturación.
- Naturaleza de monómero.
- Porcentaje del monómero.

Mediante una elección cuidadosa según uno o varios parámetros es posible variar de forma importante una o varias características de la resina elegida.

Por ejemplo, los alcoholes o ácidos de cadenas alifáticas largas darán productos mucho más flexibles que los de las cadenas cortas y una resistencia a la temperatura mucho más baja, aunque mejor resistencia al choque.

Los ciclos aromáticos aportarán rigidez, propiedades a temperaturas más elevadas y resistencia química.

No es posible definir las propiedades genéricas de las resinas poliéster. Sin embargo, es posible saber qué características particulares tendrá una resina en función de sus constituyentes de base y recíprocamente, cuál será el tipo de resina a elegir para una aplicación determinada.

Resinas de gran consumo

Para la obtención de materiales que no exigen características particulares (resistencia al fuego, mecánica, anticorrosión, etc.), las resinas utilizadas en los diferentes procedimientos de moldeo tienen casi siempre los mismos constituyentes de base. De hecho sólo se diferencian en las proporciones relativas de estos constituyentes o por el empleo de muy bajas cantidades de aditivos que permiten adaptar algunas características al procedimiento de moldeo elegido. Por ejemplo, mediante la variación de las proporciones relativas de diácido y del porcentaje de estireno se puede ajustar la reactividad de la resina.

En la composición de este tipo de resinas encontraremos:

- Anhídrido maléico (más barato que el fumárico).
- Anhídrido ortoftálico, antes que el ácido isoftálico.

- Propilenglicol (el más barato) o polietilenglicol.
- Estireno (entre el 33 y en 50% en peso según las resinas). A veces se reemplaza con el metacrilato de metilo.

Resinas de características específicas

Al contrario que las resinas de uso general, los constituyentes de base estarán relacionados directamente con las características buscadas.

Las principales resinas especiales son:

- Resinas para preimpregnados SMC/BMC, dentro de las cuales se pueden establecer subgrupos:

- *Resinas para sistemas standard*, sin compensación de retracción, que representan el 90% del mercado del SMC. Aparentemente no tiene ninguna diferencia con relación a las de gran consumo pero es necesario decir que tienen una cualidad específica fundamental, que consiste en que con ellas debe obtenerse siempre la misma curva de evolución de la viscosidad para obtener una buena reproductibilidad de los preimpregnados. Tienen como base generalmente un ácido maléico orto-ftálico.

- *Resinas para sistemas de baja retracción*, generalmente a base de ácido iso-ftálico con un fuerte porcentaje de maléico, se presentan con un aditivo termoplástico en sistema de uno o dos componentes.

Los criterios de elección de estas resinas, más caras que las standard son:

- Velocidad y nivel de maduración.
- Constancia de la calidad para una cinética reproducible.
- Aspecto de superficie después del moldeo.
- Resinas anticorrosión, generalmente ligadas a los procedimientos de moldeo por contacto, enrollamiento y centrifugación/rotación.

La composición de las resinas anticorrosión es variable en función de las características de resistencia química específica, siendo las más corrientemente utilizadas:

- Resinas Bisfenólicas, a base de bisfenol A, polipropilenglicol, ácido fumárico y estireno.
- Resinas Iso-ftálicas, a partir del ácido iso-ftálico/ácido fumárico, neopentilglicol y estireno.
- Resinas Tereftálicas, a base de ácido tereftálico.

Para estos tres grupos de resinas anticorrosivas, los dos primeros presentan una buena resistencia a los ácidos, siendo menor su resistencia a los álcalis y las bases.

Las del grupo tercero y cuarto son más específicas para la resistencia al agua (hidrólisis), aunque tienen también buenas características de resistencia a los ácidos y las bases.

El criterio de elección es principalmente la resistencia al medio corrosivo al que la resina está destinada.

- Resinas alimentarias, utilizadas cuando se busca únicamente una polimerización total, es decir, un porcentaje de monómero residual (estireno) nulo o muy bajo.

Hay dos tipos de composición:

- Iso-ftálico/fumárico/polipropilenglicol/estireno.
- Tetrahydro-ftálico/fumárico/polipropilenglicol/estireno.

El criterio de elección es ante todo la calidad: aceptación del material compuesto por un laboratorio homologado según las normas alimentarias del país en el que vaya a ser utilizado.

- Resinas "fuego". Hay numerosas resinas con características de resistencia al fuego, pero según grados muy

diversos. Este tipo de resinas se puede obtener por diversos medios:

- Modificando químicamente la misma resina introduciendo en los constituyentes de base halógenos en gran cantidad (por ejemplo, cloro o bromo en el ácido o glicol)
- Asociando la resina clásica a otros productos que aportarán la resistencia al fuego (se usan preferentemente aditivos halogenados o fosfatos orgánicos con agentes sinérgicos de formación de humos tales como el trihidróxido de antimonio y cargas como el aluminio hidratado).
- Mediante los dos procesos anteriores combinados.

Las resinas que resuelven bien este problema son generalmente a base de anhídrido maléico con ácido HET o ácido tetrabromo itálico o tetracloro itálico y etilenglicol.

Matrices termoplásticas

La gama de termoplásticos es enorme; en líneas generales podemos decir que de cada cinco plásticos usuales sólo uno es termoestable, siendo termoplásticos los otros cuatro. Por otra parte, así como en los termoestables existen grandes grupos con características similares, en los termoplásticos la variedad de características y propiedades imposibilita tratarlos en grupos, salvo contadísimos casos.

Es por ello que nos vamos a centrar en los de uso más corriente.

Policloruro de Vinilo (PVC)

Uno de los plásticos más populares es, sin duda, el policloruro de vinilo, también denominado (incorrectamente) cloruro de polivinilo y casi siempre designado por sus siglas: PVC.



Figura 1.8. Cubierta de complejo residencial en PVC.

El PVC fue descubierto a nivel experimental por el francés Regnault en 1838, pero no adquirió carta de naturaleza hasta 1912 con los trabajos del alemán Klatte. Sin embargo, su fabricación no comenzó hasta 1931 en la IG Farbenindustrie alemana, gracias a los trabajos de Hubert y Schonburg.

Para que el PVC tenga utilidad, una vez que sale de la planta de polimerización, es necesario añadirle una serie de aditivos (estabilizantes, lubricantes). Pero además de éstos, indispensables, el PVC admite otros: plastificantes, elastificantes, cargas, otros polímeros, etc., y es esto lo que le hace tan popular y apreciado, ya que en razón del número y proporción de aditivos que contenga el PVC da lugar a materiales aparentemente muy diversos y con características muy particulares. Así podremos encontrarlo como un material rígido, más o menos flexible, o hasta casi como caucho; transparente, translúcido o totalmente opaco; compacto o espumado; frágil o tenaz; mate o brillante, etc. Se puede decir que el PVC es el plástico más versátil de todos los conocidos.

El PVC es, por naturaleza, un polímero amorfo cuyas propiedades están en enorme dependencia de la formulación (aditivos) de cada material concreto. En general podemos decir que sus propiedades mecánicas no son excelentes dentro de la gama ofrecida por los plásticos; además, con la posibilidad de verse reducidas a bajas temperaturas (a partir de los -10°C); su resistencia química es buena, aunque sea sensible a ciertos disolventes (hidrocarburos aromáticos y clorados, ésteres y cetonas) y presenta un comportamiento muy satisfactorio a los agentes atmosféricos (luz incluida), salvo que los aditivos añadidos no sean los adecuados para ese fin.

El PVC plastificado se utiliza en las viviendas en forma de cortina en la ducha o de manguera flexible en el jardín. No obstante, las aplicaciones de este plástico son muchas más: recubrimiento aislante de cables eléctricos (casi todos los cables de hoy), tuberías y mangueras flexibles, recubrimiento de tejidos, o piezas metálicas, filmes para usos diversos (entre ellos todos los juguetes inflables), pavimentos, etc.

Polietileno (PE)

En 1931, los ingleses Perrin y Swallow, en los laboratorios de la ICI (Imperial Chemical Industrial), descubrieron que el etileno a temperaturas del orden de los 170°C y presiones de hasta 1400 atmósferas daba un polvillo blanco, de aspecto ceroso: el polietileno. Las características más significativas de este polietileno eran su extraordinaria resistencia química y dieléctrica, y su flexibilidad, que lo hacían especialmente adecuado para aislamiento de cables. Pero la investigación sobre su posible fabricación industrial se prolongó hasta 1939, cuando se comprobó que el polietileno era el aislamiento ideal para cables de alta frecuencia, cosa vital para el entonces incipiente radar. Por eso, este polímero fue utilizado solamente como material bélico hasta el fin de la Segunda Guerra Mundial.

Entretanto ya se habían montado plantas de producción y se había comprobado lo incómodo, y hasta cierto punto peligroso, que era trabajar en esas condiciones de presión y temperatura.

Unos trabajos iniciados por el italiano Natta sobre polimerización de olefinas dieron lugar a que el alemán Ziegler, del Instituto Max Plank, consiguiera la polimerización del etileno a presión atmosférica y con temperaturas superiores a los 70°C . Este polietileno, aparecido en 1953-1955, no se parecía en nada al anterior.

En efecto, el primer polietileno era blando, casi transparente y no conservaba su consistencia más allá de los $70-80^{\circ}\text{C}$, en tanto que este de ahora era casi rígido, opaco y resistía los $110-120^{\circ}\text{C}$. En seguida se vio que la diferencia se debía que el primero tenía una estructura muy ramificada, en tanto que el segundo era muy lineal. Ello comportaba una estructura de carácter amorfo en el uno y de tipo cristalino en el otro. Una consecuencia inmediata, derivada de la compacidad de estas estructuras, era que el uno tenía una densidad (entre 0,91 y 0,93) más baja que el otro (entre 0,94 y 0,96).

Finalmente se ha adoptado internacionalmente el criterio de referirnos a su densidad y así, se utilizan las siglas LDPE (low density polyethylene) para los más ramificados y HDPE (high density polyethylene) para los más cristalinos. A este grupo se añadieron posteriormente unos polietilenos intermedios cuya densidad se encontraba entre 0,93 y 0,94 y que se bautizaron como MDPE (medium density polyethylene). Más recientemente, han aparecido unos polietilenos de baja densidad pero estructura muy lineal que han recibido las siglas LLDPE (lineal low density polyethylene).

Estas diferentes estructuras hacen que las características sean muy diferentes. Además, el polietileno, por un

proceso especial de formulación y moldeo, puede acabar con una estructura parcialmente reticulada que le confiere unas características muy especiales (especialmente en resistencia térmica).

Todos estos polietilenos, independientemente de sus diferencias estructurales, se basan en una cadena parafínica (etileno); de ahí su notabilísima resistencia a casi todos los productos químicos, incluyendo a los disolventes (si bien alguno de estos últimos puede causar un cierto hinchamiento). Pero también, por esa naturaleza parafínica, se trata de un material apelar, es decir, antiadherente frente a adhesivos, tintas, barnices, etc., y, en el caso de la impresión, exige tratamientos especiales superficiales para conseguir un resultado aceptable.

El polietileno de baja densidad (LDPE) se utiliza para fabricar bolsas flexibles para los usos más diversos. Su inercia química y mínima aditivación lo hacen muy apreciado para infinidad de artículos domésticos e industriales en los que interesa una cierta flexibilidad.

Polipropileno (PP)

A partir de los trabajos de Natta y Ziegler con el polietileno, se intentó obtener otros polímeros partiendo de las olefinas. Así, casi a continuación del HDPE, se obtenía, partiendo del propileno, el polipropileno (PP), cuya fabricación se inicia hacia 1957 con un gran optimismo sobre las posibilidades de este nuevo polímero. El PP era rígido pero elástico, sus propiedades mecánicas superaban al HDPE, su tacto era agradable (no ceroso como el polietileno), brillante, transparente, resistía hasta 130° C, su densidad (0,9) era la más baja de los plásticos conocidas y, por si fuera poco, su precio era uno de los más bajos.

Lamentablemente el PP tenía dos características negativas de gran trascendencia: la primera era su sensibilidad al frío, por debajo de +4° C; la segunda era su extraordinaria sensibilidad a la luz ultravioleta, que lo hacía envejecer rápidamente. Por eso el PP quedó relegado a unas cuantas aplicaciones en las que esos dos inconvenientes no tenían mayor importancia, y su uso fue escaso hasta los años setenta, en que reapareció con fuerza en el mercado de los plásticos.

Esta reaparición tuvo dos causas. Por un lado, el descubrimiento de nuevos estabilizantes a la luz protegía adecuadamente al PP; por otro, la copolimerización de propileno-etileno había dado lugar a unos productos de buena resistencia al frío, y además se había comprobado que el PP, a diferencia de los polietilenos, admitía con cierta facilidad cargas reforzantes, tales como fibras de vidrio, talco, amianto, etc., dando lugar a materiales de propiedades mecánicas muy interesantes. La otra circunstancia que favoreció la reaparición del PP fue la búsqueda de materiales más económicos y racionales por sectores tales como el automóvil o los electrodomésticos (línea blanca) ante la crisis industrial y energética mundial.

El polipropileno es lineal (y cristalino) y, por tanto, también es apto para rafia y monofilamentos. Efectivamente, un gran consumo de PP es en forma de multifilamento para aplicaciones textiles, entre ellas y de forma destacada la fabricación de moquetas. En forma de rafia lo encontraremos en cordelería y sacos tejidos. Y una aplicación que podríamos incluir en la rafia (por ser una cinta estirada) es la de flejes para embalaje.

El PP presenta una curiosa particularidad derivada de su especial ordenación macromolecular: si se moldea una pieza estrangulando el paso del material en una cierta línea, éste se orienta de tal forma que permite la flexión alterna casi ilimitadamente: es lo que llamamos el "efecto bisagra". Esto permite moldear, por ejemplo, cajas, estuches, maletines, etc., de una sola pieza, previendo el efecto bisagra entre el cuerpo y la tapa o las dos partes que han de girar. Pero también se ha aprovechado este efecto bisagra en infinidad de piezas técnicas, no sólo por el efecto de giro sino también para facilitar el montaje de ciertos conjuntos mediante piezas abatibles.

El PP admite temperaturas de trabajo cercanas a los 100° C; esto, junto a su inercia química, lo hace muy apto para tuberías de fluidos calientes muy especialmente en la industria química, pero también en otras aplicaciones como es el caso de la calefacción bajo pavimentos.

Poliestireno (PS)

El poliestireno es uno de los polímeros más fáciles de obtener. Tanto es así que ya en 1839 fue descrito por el boticario alemán Simón. Pero aunque hubo algún tímido intento de utilización en años posteriores no empezó a tomarse en serio hasta 1925 por la empresa norteamericana Naugatuck.

Esta relativamente sencilla obtención, junto a su brillo y transparencia, su fácil moldeo y su precio económico (hasta hace pocos años), hizo que el poliestireno fuese un plástico muy popular, a pesar de sus dos características negativas considerables: su gran fragilidad (derivada en parte de su rigidez) y su sensibilidad a prácticamente todos los disolventes.

Una vez frío el conjunto, se obtiene un bloque esponjoso en el que es fácil distinguir su constitución globular y que denominamos poliestireno expandido, aunque vulgarmente se denomine con nombres derivados de sus marcas comerciales (estiropor, porexpan, etc.). Este bloque puede ser cortado en placas de aislamiento térmico o en formas adecuadas para construir decorados cinematográficos, pues su densidad puede estar alrededor de 0,5.

Introduciendo dicho producto en una máquina de inyección, la masa que sale de la inyectora es una mezcla de poliestireno fundido y un disolvente que, a esta temperatura, es prácticamente gas y que intenta escaparse. Así, de la primera masa que sale, el gas (disolvente) puede escaparse y deja una masa de poliestireno fundido más compacta; la masa que entra a continuación queda cubierta por la de antes; en consecuencia, el gas tiene más dificultades para escaparse; y cuanto más masa entra y más se va llenando el molde, más difícil se hace la pérdida de gas. En resumen, las capas externas de la pieza prácticamente no tienen gas, y a medida que vamos hacia el centro de la pieza, cada vez hay más gas.

La consecuencia de este proceso será que una pieza moldeada en estas condiciones presentará una corteza casi compacta y, a medida que nos acercamos a su centro, irán apareciendo burbujas cada vez mayores. Si se guardan unas ciertas proporciones de espesor de la pieza, puede conseguirse una sección que, cortada por la mitad, presenta una estructura en bóvedas continuas progresivas y que, indudablemente, es una de las estructuras más sólidas que se conocen.

Así, aquel poliestireno tan frágil, inyectado por este sistema, se convierte en unas piezas de buena resistencia mecánica, tales como muebles y elementos para los mismos, cajas para televisores u otros aparatos similares, con una apariencia física (peso y textura) similar a la madera.

Por otro lado se encuentra el expandido, típico del poliestireno ya descrito hace poco, y que se caracteriza por su particular estructura de bolas expandidas y soldadas entre sí.

Una de las particularidades del poliestireno es su gran resonancia acústica. Esta característica ha sido muy bien aprovechada en radio y televisión haciendo las cajas de estos aparatos con PS (compacto o celular), con lo que se refuerza la potencia de sonido de altavoces más bien pequeños. Por lo mismo, el PS expandido puede utilizarse como aislamiento térmico, pero no como aislamiento acústico. Sus aplicaciones estrella en la construcción son: bovedillas, encofrados y núcleos de sandwich para aislamiento.

Copolímeros de estireno (ABS, SAN)

Ante la fragilidad del poliestireno, a alguien le surgió la idea de mezclarlo con cauchos, y aparecieron las primeras aleaciones de PS/caucho, que recibieron el calificativo de poliestireno antichoque y pasaron pronto al olvido ya que el caucho tendía a aflorar a la superficie de las piezas y, por otra parte, cesaba al cabo de un tiempo su función reforzadora, especialmente a la intemperie. Estas aleaciones dejaron de emplearse ante la aparición de copolímeros del PS con cauchos.

El primero fue el copolímero de acrilonitrilo/butadieno/estireno (ABS). Con él se había perdido la transparencia del PS, pero se había mejorado enormemente su resistencia al impacto, presentaba una mejor resistencia a hidrocarburos y aceites, e incluso se ensanchaba algo el margen de temperaturas de utilización (60-70°C para el PS y 80-100°C para el ABS). Así, el ABS irrumpió en el campo de los electrodomésticos y pequeña maquinaria, en infinidad de piezas para el automóvil, radio y televisión, etc.

Posteriormente apareció el copolímero de estireno/acrilonitrilo (SAN), de características similares al ABS, pero conservando una buena transparencia; por eso se usa en luminotecnia y en piezas de los sectores ya citados en los que se desee la visibilidad.

El ABS, además, permite su metalización; es decir, su recubrimiento con una capa metálica (por medios galvánicos) con cierta facilidad; ello es interesante para una serie de aplicaciones puramente decorativas, como son los tapones de perfumería y cosmética, mandos de aparatos, embellecedores de vehículos, etc., como funcionales: faros de automóvil con la parábola incorporada, piezas conductoras, etc.

También se encuentra en este grupo el SB, copolímero de estireno/butadieno, que es el habitualmente llamado poliestireno antichoque, y que se considera como tal, aunque su opacidad lo aparte de él.

Lamentablemente, la evolución económica de la industria petroquímica ha influido notoriamente en los precios de las materias primas del poliestireno y sus copolímeros, por lo que, hoy día, su aplicación ya no es tan popular como lo era en los años cincuenta o sesenta, pero aún así siguen siendo materiales de gran consumo y utilidad.

Esteres de celulosa

Este grupo de plásticos resulta poco corriente. El más antiguo es el nitrato de celulosa, descrito ya en 1846 por el suizo Schönbein, si bien no aparece como producto comercial hasta 1869 de la mano del norteamericano Hyatt con la ya histórica marca de Celluloid, que pasó a definir un material: el celuloide. El celuloide era el nitrato de celulosa (CN) plastificado con alcanfor. Presentaba unas interesantes propiedades: era de una buena rigidez con una altísima tenacidad, especialmente resistente a los impactos, de aspecto atractivo y brillante, máxime cuando admitía muy fácilmente el teñido en los más variados colores y matices.

Se fabricaron con celuloide muñecos, gafas, peines y peinetas (sustituyendo al carey), artículos de tocador, bolas de billar (sustituyendo el marfil), pelotas de ping-pong, película fotográfica y cinematográfica, etc.

Lamentablemente, el CN tenía un pequeño inconveniente: ardía con facilidad e incluso era inflamable. Por eso se procuró encontrarle sustituto lo antes posible para eludir el peligro que representaba.

En 1899 el alemán Lederer completó la fabricación del acetato de celulosa, que inició su andadura (al igual que más tarde pasaría con las poliamidas) como material para fibras sintéticas en sustitución de la seda. El acetato de celulosa (CA) no tenía ninguna desventaja frente a su antecesor, el CN; más bien presentaba ventajas y, sobre todo, no era inflamable. Le siguieron el butirato de celulosa (CB) y el aceto-butirato de celulosa (CAB) y el propionato de celulosa (CP).

Estos esterres de celulosa, especialmente el CA, se consumen en cantidades importantes en forma de láminas para los usos más diversos, en gafas, pelotas de ping-pong, soporte fotográfico, etc. Su aplicación más frecuente es la de las herramientas de seguridad; igualmente, por su tenacidad y tacto agradable, se utilizan para construir teclas (en máquinas de escribir, aparatos, instrumentos musicales, etc.).

Polimetacrilato de metilo (PMMA)

Este material es también uno de los plásticos históricos, puesto que ya en 1873 fue descubierto por Caspary y Tollens; pero no tomó carta de naturaleza hasta treinta años después de la mano del alemán Rohm, y aún podemos decir que no se popularizó hasta que él mismo, a través de la firma Rohm & Haas, lanzaba en 1933 el producto bajo la marca registrada de Plexiglás, marca que se convirtió casi en el nombre genérico del PMMA.

Además de su rigidez y tenacidad, buena resistencia química (salvo a ácidos y bases concentrados y bastante disolventes) y a la intemperie, fácil moldeo y buen comportamiento dieléctrico, el PMMA presenta una transparencia tan perfecta como el mejor cristal, incluyendo su índice de refracción. De ahí que una de sus primeras aplicaciones (ya en 1907) fuese el intervenir en la fabricación de cristales de seguridad (hoy sustituido por otros materiales, como por ejemplo el polibutirato de vinilo).

Su popularidad se inicia en infinidad de artículos en los que esta transparencia cristalina resultaba una novedad de tipo suntuario; y así aparecen artículos de tocador, accesorios para cuarto de baño, elementos de decoración, etc. Pero paralelamente se iniciaban aplicaciones más serias: parabrisas y ventanas de aviones y barcos, elementos para la industria química, aparatos ortopédicos, claraboyas y cubiertas (por ejemplo, las planchas que cubren el estadio olímpico de Munich), etc.

La polimerización del PMMA es bastante simple por eso, además de moldearlo por los sistemas habituales para termoplásticos, partiendo de granulados, cabe la posibilidad de moldearlo por colada. Así, las planchas es habitual que se obtengan por colada entre dos planchas de vidrio sujetas por un marco; con ello se consiguen planchas de PMMA de grandes tamaños con una perfección de transparencia y superficie notable. Estas planchas y bloques podrán ser, después, fácilmente mecanizados y termoformados.

A la familia del PMMA - es decir, a los poliacrilatos - pertenecen otros polímeros como el poliacrilonitrilo

(PAN), apto para el moldeo, pero más conocido en forma de fibras, y una serie de copolímeros entre miembros de la misma familia o de otras, por ejemplo ya hemos hablado del ABS y del SAN en los que la A significaba poliacrilonitrilo, es decir el PAN recientemente citado.

Poliamidas (PA)

En 1930, en los laboratorios de investigación del complejo químico norteamericano de la Du Pont de Nemours, Carothers y un miembro de su equipo, J. Hill, descubren un polímero que hila con mucha facilidad en hebras de gran resistencia. Se trataba de la primera poliamida, la PA 6,6, que tendría su entrada en el mercado textil diez años después bajo la marca registrada de Nylon.

Casi al mismo tiempo, en 1938, y en el complejo químico alemán de la IG Farbenindustrie, Schlack conseguía la polimerización de la PA 6, también con la idea de las fibras y que aparecería en el mercado con la marca registrada de Perlón.

Las poliamidas se consiguen por la poliadición de un producto o la policondensación de dos productos distintos, por eso su nombre resulta tan complicado que se las denomina con las siglas PA y añadiendo el número de carbonos de que se componen la molécula básica que forma la cadena. Así, la PA 6 es la policaprolactama, ya que la caprolactama tiene 6 carbonos, y la obtenida con hexametildiamina (6 carbonos) y ácido adípico (6 carbonos más) será la PA 6,6, ó simplemente PA 66.

Después de las poliamidas ya citadas han ido apareciendo otras muchas, la mayor parte con un interés solamente científico, y hoy día las más habituales son la PA 6, la PA 6,6, la PA 6,10, la PA 11 y la PA 12.

Las poliamidas fueron los primeros plásticos que presentaban características mecánicas interesantes; efectivamente, nos encontrábamos con resistencias a la tracción del orden de los 400 a 600 kg/cm², cercana a la de algunos metales no férricos. Además presentaban una textura tal que su rozamiento era bajísimo, no necesitando aceites o lubricantes en piezas que habían de deslizarse entre sí o contra metales. Si a eso añadimos su bajo peso específico (entre 1,04 y 1,15), su buena resistencia química, su resistencia a las temperaturas que les permite trabajar hasta los 100° C, su fácil moldeo, etc., no tiene nada de particular que rápidamente se utilizasen para infinidad de piezas del tipo de engranajes, cojinetes, cremalleras (tanto las mecánicas como las de la ropa), etc. Pero a medida que avanzaba el tiempo las aplicaciones crecían: palas de ventiladores industriales y en automoción, carcasas de pequeña maquinaria, bombas, bobinas, tornillería, piezas del automóvil, etc. Curiosamente, la aplicación en fibras decayó en favor de otros polímeros (acrílicos, poliésteres).

Las poliamidas presentaban, como desventaja, un grave problema: su higroscopicidad. Las poliamidas, unas más otras menos (según el tipo), presentan una cierta admisión de agua en su estructura, pero esta agua (que en algunos tipos puede llegar hasta un 11%) tiene una clara influencia en sus propiedades mecánicas (rebajándolas), pues actúa de una forma similar a la de los plastificantes, si bien aumenta su tenacidad, y también afecta sensiblemente a su estabilidad dimensional (la pieza se hincha). Por otro lado, debe eliminarse totalmente esta agua antes del moldeo, lo que obliga a procesos de secado previo muy serios. Por eso, como luego veremos, otros plásticos posteriores tomarían el relevo de las poliamidas en muchas aplicaciones.

No obstante, su utilización sigue vigente y en auge, especialmente reforzadas con fibra de vidrio que aún les confiere mejores propiedades mecánicas y rebaja los riesgos de variaciones dimensionales.

Se utilizan las poliamidas en la fabricación de engranajes y cojinetes de electrodomésticos y máquinas de oficina y en el recubrimiento de piezas metálicas por el sistema de sinterización en lecho fluidificado, habiéndose popularizado el nombre de rilsanización (de la marca Rilsan de la PA 11) como un tratamiento protector de artículos metálicos. Estos recubrimientos tienen casi siempre el sentido protector frente a agentes químicos o ambientales; por ejemplo es muy habitual en piezas de barcos (incluidas las hélices) para protegerlas del ataque salino.

Polioximetileno (POM)

El polioximetileno, también conocido como resina acetálica, poliacetal e incluso poliformaldehído, fue obtenido ya en 1927 por Staudinger, uno de los padres de la química macromolecular, pero su inestabilidad térmica hizo que se abandonase la idea de fabricarlo, a pesar de que se trataba de un plástico de propiedades mecánicas excepcionales, algo superiores a las poliamidas, pero sin el problema de la absorción de agua. Por eso, tras largas y costosas investigaciones, se consiguió en 1958 sacarlo a la luz bajo dos aspectos distintos, el homopolímero y el

copolímero acetálicos.

En el homopolímero acetálico se consiguió su estabilidad térmica jugando con complejos sistemas de aditivos estabilizadores, en tanto que en el copolímero se consiguió injertando en la cadena unos núcleos que le daban la estabilidad térmica deseada; por eso se le dio algo impropia el nombre de copolímero. La diferencia no sólo afectaba a la estabilidad térmica, sino también a la resistencia química en general y en algunos aspectos nimios de las propiedades mecánicas.

El polioximetileno, o resinas acetálicas, es un plástico duro, de elevadas características mecánicas, con un buen coeficiente de deslizamiento (como ocurría con las PA), de resistencia química buena a disolventes, grasas y otros productos, pero deficiente en medios ácidos o fuertemente alcalinos, y no presenta absorción de agua. Su moldeo no exige, por tanto, secados previos, pero sí una atención cuidadosa a las temperaturas para que no se degrade.

Por lo que hemos ido diciendo se comprende que fuese el primer competidor de las poliamidas en muchas piezas mecánicas. Por otro lado, el POM tiene un efecto de resorte extraordinario; por eso tuvo gran aceptación en piezas mecánicas que debían trabajar como tales: muelles, ballestas, resortes, etc. También podemos poner como ejemplo de aplicación los que ya decíamos para PA: engranajes, cojinetes, piezas mecánicas, carcasas de pequeñas máquinas, etc.

Se utiliza el POM en la fabricación de los elementos de sujeción de los esquís y las "margaritas" de máquinas de escribir y de marcadoras sobre cinta adhesiva.

Poliésteres termoplásticos

Una derivación de esos poliésteres fueron los tipos para fibras que se han popularizado a través de sus marcas comerciales: Terylene, Dacron, Trevira, Diolen, etc. Otra derivación fue la fabricación de filmes de altas exigencias mecánicas y eléctricas.

De ahí salió la vertiente de los poliésteres que, lineales y de alta cristalinidad, eran termoplásticos en su comportamiento. El primero fue el polietilentereftalato (PETP), de alta resistencia mecánica y buen comportamiento a esfuerzos permanentes, muy buen coeficiente de deslizamiento, bastante buena resistencia química, y con temperaturas admisibles de utilización de hasta 200° C por corto tiempo.

El PETP tiene una cierta absorción de agua que no afecta a sus propiedades, pero resiste mal al agua hirviendo (se hidroliza y descompone); por tanto debe vigilarse que no contenga agua durante el moldeo con los oportunos y estrictos procesos de secado y acondicionamiento.

Un posterior desarrollo en este campo fue la aparición del polibutilentereftalato (PBTP), cuya características son similares a las del PETP, pero complementan su campo de aplicación, especialmente reforzado con fibras de vidrio. Constituyen un grupo de materiales de aplicación muy específica y técnica.

Policarbonato (PC)

El policarbonato nació por los años cincuenta al socaire de las investigaciones que se estaban haciendo en la rama de los poliésteres. Su especial interés radica en que es un plástico amorfo y transparente, con una temperatura admisible de trabajo de hasta 135° C, conjuntamente con unas muy buenas propiedades mecánicas y tenacidad, buena resistencia química (salvo a los álcalis) y buena estabilidad dimensional.

Por consiguiente encontró rápida aplicación en piezas que exigían transparencia y esfuerzos elevados o temperaturas, especialmente en electrotecnia y en aparatos electrodomésticos.

Pero su tenacidad y buen acabado le abrieron otras puertas: cajas de aparatos electrodomésticos, piezas industriales, piezas del automóvil, luminotecnica, material de dibujo, cascos de protección (tanto laboral como de motorista o de bombero), biberones, etc.

Lamentablemente, el PC se hidroliza con el agua a elevadas temperaturas; por eso requiere un riguroso secado y acondicionamiento antes de su moldeo.

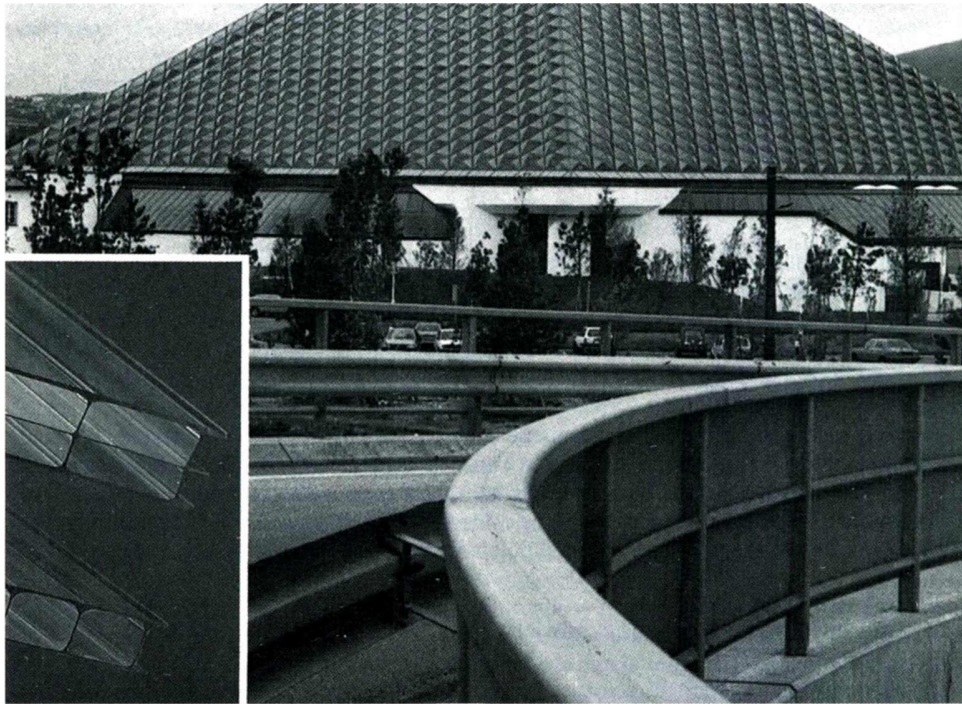


Figura 1.9. Cubierta realizada con policarbonato termoconformado.

Plásticos fluorados

El plástico fluorado más típico es el politetra-fluoretileno, el PTFE, más conocido vulgarmente por una de sus marcas comerciales: Teflon.

El PTFE es uno de los materiales más resistentes químicamente que se conocen, pues solamente es atacado por productos tan poco frecuentes como el sodio fundido o el flúor nascente. Presenta una marcada plastodeformación, pero puede mejorarse con la adición de cargas reforzantes. Su resistencia dieléctrica es también excepcional, así como su coeficiente de deslizamiento.

A pesar de tratarse de un termoplástico, no puede moldearse, ya que su viscosidad en fundido es tan alta que no puede moverse la masa en las máquinas. El único sistema de obtener piezas es el prensado en frío del polímero en polvo, después sintetizar el bloque y recurrir a la posterior mecanización.

Lo anterior, junto a su costosa polimerización, lo convierte en uno de los plásticos más caros, no sólo como materia prima sino también en su moldeo o transformación; por eso sólo se recurre a él cuando es realmente necesario; es parte esencial de todas las plantas químicas, aeronaves y satélites, equipos de comunicación (radiotelefonía, televisión, etc.), equipos médicos y quirúrgicos, instrumentos de control de procesos, etc.

Hemos dicho que el PTFE no se puede moldear por los sistemas habituales, lo cual constituye uno de los principales inconvenientes. No tiene nada de particular, por tanto, que se hayan investigado todas las posibilidades para conseguir variantes de ese plástico que permitan el fácil moldeo. En esta línea está, en primer lugar el PETFE (copolímero de etileno y fluoroetileno) por su proximidad de composición que no cronológicamente.

1.2.3 Materiales para núcleos de sandwich

Para lograr que una construcción estructural tipo "sandwich" responda correctamente durante su vida en

servicio, el núcleo deberá poseer unas determinadas propiedades mecánicas, características térmicas y dieléctricas, etc. bajo las condiciones dadas, pero manteniendo su baja densidad para satisfacer las limitaciones de peso.

En las construcciones tipo "sandwich" la madera está prácticamente desechada, salvo en construcción naval, que va siendo sustituida por las espumas y empleándose fundamentalmente el núcleo de panal o nido de abeja en la industria aeroespacial.

Núcleos de "nido de abeja"

Se realizan a partir de láminas delgadas de diversos materiales metálicos y no metálicos cuyas propiedades, unidas al espesor de la lámina y la forma y tamaño de la celdilla formada, pueden variarse considerablemente y conducir a productos con un amplio margen de densidades, resistencias, etc.

Las láminas se unen entre sí mediante adhesivos de distintos tipos o por soldadura, formando estructuras por lo general regulares y repetitivas a base de un conjunto de prismas rectos de lados comunes en forma de "panal" y con la celdilla básica de sección transversal dada, en función de la aplicación del núcleo, siendo la más común la forma hexagonal.

Los núcleos de nido de abeja están fabricados con láminas de materiales metálicos (aleaciones de aluminio, aceros, titanios, etc.) y no metálicos (fibra de vidrio, Nomex, Kevlar, papel, etc.), éstos últimos impregnados con resinas a fin de darles rigidez.

Los núcleos a base de fibra de vidrio y poliaramidas impregnadas con resinas de poliéster, fenólicas, etc., se suelen emplear en aplicaciones que requieran una adecuada respuesta a altas frecuencias, que no puede ser proporcionada por los núcleos metálicos, cuyo comportamiento es, además, peor desde el punto de vista del aislamiento térmico.

Entre los núcleos no metálicos más utilizados se pueden citar:

- Fibra de vidrio: Son normalmente más caros que los de aluminio, variando su densidad entre 0,035 y 0,192 g/cm². Están impregnados con resinas fenólicas, nylon-fenólica, fenólica-poliéster, poliéster, silicona o poliimida. Suelen tener una impregnación inicial del tejido y luego se impregna el núcleo completo mediante inmersión en la resina correspondiente, que puede o no ser del mismo tipo que la de impregnación inicial del tejido.

Estos núcleos presentan buenas propiedades dieléctricas, satisfaciendo los requerimientos del empleo de radomes. Son buenos aislantes y resisten la corrosión y el ataque del aceite y de combustibles.

- Poliaramidas: Son tejidos de amidas aromáticas impregnados con resinas fenólicas y conocidos como NOMEX. Se caracterizan por una alta resistencia y rigidez, con tamaños de celda pequeños y una densidad baja en comparación con los metálicos. Se pueden emplear para temperaturas de servicio de hasta 150° C. Su resistencia a compresión sin estabilizar oscila entre 0,62 y 4,48 MPa para densidades comprendidas entre 0,024 y 0,088 g/cm³.

Tejidos de asbestos impregnados con resinas fenólicas o silicona.

- Papel impregnado con epoxi o fenólica.
- Tejido de fibra de carbono con resinas fenólicas.

Núcleos de "baja densidad"

Se suele referir esta denominación a los núcleos formados por espumas ("foam" en inglés), materiales que pueden definirse como estructuras celulares con burbujas de gas de densidad menor que la de las resinas de que proceden, oscilando generalmente entre 0,008 y 0,960 g/cm³.

Las espumas son dispersiones de grandes volúmenes de gas en pequeños volúmenes líquidos con burbujas que crecen mucho, quedando muy cerca unas de otras, deformándose y adoptando formas casi poliédricas, con delgadas

capas de líquido entre ellas, líquido que solidifica constituyéndose las espumas denominadas poliédricas.

Existe una gran variedad de espumas en el mercado, siendo cada una de ellas más adecuada para cada aplicación concreta en función de las especificaciones de diseño del "sandwich".

Las propiedades de las espumas dependen fundamentalmente de:

- Composición del polímero.
- Estado del polímero (orientación, cristalinidad, historia térmica).
- Densidad de la espuma.
- Estructura de las celdillas (tamaño, geometría, fracción de células abiertas).
- Composición del gas espumante.

Una propiedad muy importante de estos materiales en cualquiera de sus aplicaciones es la resistencia a la llama, que es problemática en este tipo de materiales debido a que su estructura celular permite que la combustión pueda progresar rápidamente. Para mejorar la resistencia a la llama, se suelen incorporar a las espumas aditivos que contienen bromo, cloro y fósforo, con lo que se hacen resistentes a la llama.

En las espumas de tipo rígido que actúan como núcleo de una construcción "sandwich", las propiedades mecánicas a tener más en cuenta la resistencia y módulo en compresión, que, a su vez, están fundamentalmente afectados por la composición y densidad de la espuma así como por la estructura de las celdillas. En general, dicha resistencia crece de forma aproximadamente lineal con la densidad de la espuma.

Las espumas de tipo flexible tienen aplicaciones muy diferentes a las anteriores, dependiendo su comportamiento en compresión fundamentalmente de la composición del polímero, de la densidad de la espuma y de la morfología de celdillas.

El núcleo de espuma puede obtenerse:

- A partir de bloques, planchas, hojas, etc., mediante operaciones de mecanizado hasta llegar a la forma deseada.
- Fabricándola "in situ", obteniendo mediante colada (por presión diferencial o gravedad) la pieza o conjunto.

El "sandwich" puede, entonces, obtenerse bien preparando separadamente el núcleo de espuma y los revestimientos, y luego uniéndolos o bien colando la espuma directamente entre los revestimientos, etc.

Poliuretano

Los poliuretanos son una familia de polímeros con características diversas en función de los productos de partida, pero normalmente los englobamos bajo el mismo nombre genérico de poliuretanos, con las siglas PUR.

Según los productos de partida, sus proporciones y las condiciones de polimerización podremos obtener un producto final termoplástico o considerar a los PUR como el eslabón que engarza plásticos y cauchos, pudiendo figurar honrosamente en ambos lados.

Aquí, como es lógico, nos vamos a referir fundamentalmente a los PUR con carácter termoestable. Los productos de partida son un isocianato (por ejemplo, el toluen diisocianato TDI o el metilen-bis 4 fenilendiisocianato MDI) y un polioli de tipo poliéster o poliéter. La reacción de polimerización es generalmente muy rápida, y, al ser en fase líquida, permite el moldeo en el momento de la propia reacción.

Esta reacción es tan rápida que si hacemos burbujear un gas en el momento de mezclar los productos a reaccionar queda atrapado y el producto resultante es una esponja, rígida o flexible, según sean los productos de partida.

Esto nos lleva a un sistema de moldeo típico de estos materiales, el llamado *espumado in situ*. Imagínense una estación de servicio de gasolina en la que la manguera es doble, pero con una sola boquilla; cada manguera se alimenta de un depósito distinto: una lo hace de un depósito que contiene uno de los productos de partida y la otra lo hace de otro depósito que contiene el producto de partida y un producto fácilmente gasificable. Al abrir la boquilla

se juntarán los tres productos en una masa espumada que llenará el recipiente que usemos como molde, solidificando rápidamente.

Los poliuretanos, al margen de sus características físicas que ya dijimos que pueden ser muy variadas, presentan una buena resistencia mecánica y una inmejorable tenacidad; se comportan muy bien ante la abrasión; su resistencia química es muy buena y se comportan bien ante las bajas temperaturas.

Los PUR en formas rígidas se utilizan en gran cantidad para aislamientos térmicos y acústicos en edificios, vehículos, instalaciones frigoríficas, etc.

Los PUR elastoméricos son habituales en la industria, en franca competencia con otros cauchos, en juntas dinámicas o estáticas, especialmente en medios agresivos.

Otros núcleos

Otros tipos de núcleos utilizados en construcciones "sandwich" son los "naturales", a base de madera generalmente de balsa, los de tipo corrugado y los de las construcciones "sandwich" multi-núcleo para aplicaciones especiales. Muy utilizados en construcción son el poliestireno expandido y el PVC (ambos comentados anteriormente).

1.2.4 Elastómeros

Un material puede considerarse como elastómero cuando es capaz de deformarse de manera notable por efecto de esfuerzos de cierta consideración, recuperando, además, su forma inicial tan pronto cesan de ejercerse dichos esfuerzos. Concretamente, en ensayos a tracción, la relación entre la longitud final de una probeta y la inicial puede llegar a valores del orden de 300-800%, sin que se produzca la rotura y sin que aparezcan deformaciones permanentes una vez terminado el ensayo.

Los elastómeros deben ser polímeros amorfos, con temperatura de transición vítrea inferior a la de trabajo o ambiente y deben estar constituidos por macromoléculas ligeramente reticuladas (una reticulación cada 100 ó 200 átomos de carbono), con segmentos moleculares largos y voluminosos.

Con caucho, agente vulcanizante, acelerantes, activadores y antioxidantes, se obtiene un vulcanizado de goma pura, pero, por razones técnicas y económicas, estos vulcanizados se emplean poco. En general contienen además cargas, en proporciones variables y muchas veces incluso superiores a las de los componentes anteriores. Las cargas pueden ser reforzantes y diluyentes. Las primeras mejoran las propiedades mecánicas, en especial la resistencia a la abrasión y al desgarro y en muchas ocasiones también la resistencia a la tracción. Especial importancia tiene en los elastómeros el efecto reforzante de diversos tipos de negro de carbono (o de humo), consistentes en partículas de grafito (hollín) de muy pequeño tamaño (0,02-0,05 μm) obtenidas en condiciones especiales de baja temperatura, de forma que su superficie queda activada, probablemente debido a la presencia de grupos polares carboxilo u oxidrilo, que actúan como puntos de anclaje entre las cadenas, aumentando la resistencia a la rotura y el módulo de elasticidad, como se indica en la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1. Efecto de la proporción y de las características del negro de carbono sobre las propiedades de los elastómeros

	Mayor proporción de	Mayor tendencia a la aglomeración del	Mayor superficie específica del
	negro de carbono	negro de carbono	negro de carbono
Viscosidad	aumenta	aumenta	aumenta
Pre vulcanización	disminuye	disminuye	disminuye
Tiempo de incorporación	aumenta	aumenta	aumenta
Facilidad de dispersión	disminuye	aumenta	disminuye
Contracción en la extrusión	disminuye	disminuye	disminuye
Acabado superficial de un perfil extruido	mejora	mejora	mejora

Dureza	aumenta	aumenta	aumenta
Rigidez Resistencia a la tracción	aumenta aumenta hasta una cierta proporción	aumenta disminuye	aumenta aumenta
	y luego disminuye		
Alargamiento a la rotura Resistencia al desgarró	disminuye aumenta hasta una cierta proporción	disminuye no cambia	disminuye aumenta
Resistencia a la abrasión	y luego disminuye aumenta hasta una > cierta proporción		
	y luego disminuye		
Resiliencia	disminuye	no cambia	disminuye
Histéresis Conductividad eléctrica	aumenta aumenta	aumenta aumenta	aumenta aumenta

Las características distintivas de los diversos tipos de negro de carbono son fundamentalmente el tamaño de partícula, la superficie específica y el índice de estructura, que expresa la tendencia a la aglomeración de las partículas de negro de carbono. Además del negro de carbono, se utilizan cargas reforzantes inorgánicas como la sílice precipitada y los caolines duros.

Los cauchos de mayor interés industrial se pueden clasificar en cauchos de uso general y de usos especiales.

En el primer grupo figuran el caucho natural y los que con él compiten en la mayoría de sus aplicaciones, entre los que se encuentran: el poliisopreno sintético (IR), el caucho de polibutadieno-estireno (SBR) y el polibutadieno (BR).

Los cauchos de usos especiales se usan en aplicaciones específicas debido a sus características particulares y en general tienen un alto coste.

En la Tabla 1.2 se incluye la distribución del consumo de caucho en el mundo, excluyendo los países de economía planificada, y en España. Como puede verse, el consumo de los cauchos de uso general es muy superior al de los demás tipos.

Tabla 1.2. Consumo de los diversos tipos de caucho

	Mundial (1982)		España (1986)	
	MTm	%	Tm	%
Caucho natural	2.890	38,0	92.09 (1)	43,6
SBR/BR	3.339	43,9	81.000 (2)	38,4
IR	128	U	3.079	1,5
Cauchos etileno-propileno	322	4,2	10.571 (EPDM)	5,0
Cauchos butílicos	374	4,9	7.286 (IIR)	3,4
CR	279	3,7	5.610	2,7
NBR	182	2,4	5.697	2,7
Otros cauchos sintéticos	83	1,1	5.781	2,7
Total	7.597	100,0	211.114	100,0

(1) No incluye el consumo de látex natural.

(2) Incluye elastómeros termoplásticos.

El látex exudado por ciertas especies arbóreas contiene 25-50% del polímero natural 1-4 cis-poliisopreno, en forma de una dispersión acuosa de partículas esféricas de 0,3 a 1,0 µm, recubiertas por una película proteínica emulsionante que coagula en presencia de ácidos. El caucho o goma natural (NR, Natural Rubber),

una vez coagulado y purificado, se lamina mediante rodillos en hojas rectangulares o bloques que se comercializan en diversas calidades. Aunque durante muchos años la clasificación de las distintas variedades de caucho natural se hizo por inspección visual de las hojas y por comparación con muestras patrón, en 1965 el gobierno de Malasia, primer país productor de caucho natural, introdujo la clasificación SMR ("standard malasyan rubber") basada en especificaciones técnicas y, posteriormente, la Organización Internacional de Normalización creó la norma IS 2000 que define TRC ("technically classified rubber").

En su estado natural el caucho es extraordinariamente elástico, alcanzando alargamientos a la rotura próximos al 1000%, pero ofrece una reducida resistencia a la tracción; a bajas temperaturas es duro y llega a cristalizar espontáneamente a 28° C, e incluso a temperaturas superiores, cuando está sometido a tensiones importantes. Con el tiempo pierde elasticidad cuando está al aire y sometido a la acción de la luz solar. Se disuelve fácilmente en disolventes no polares (aceites minerales, benceno, tolueno, tetracloruro de carbono, etc.) y es atacado por agentes oxidantes (ácido nítrico, hipoclorito, etc.) y por el ácido sulfúrico.

Un material con futuro prometedor es el caucho natural epoxidiado (ENR) obtenido por epoxidación de una fracción de los enlaces dobles del caucho natural. De esta manera se mejora la resistencia a los aceites, se disminuye la permeabilidad al aire y se aumenta la capacidad de amortiguar impactos. Se refuerza con facilidad con sílice precipitada.

Para sustituir al caucho natural se desarrollaron polímeros sintéticos a base de diolefinas (butadieno o isopreno, principalmente), que polimerizan linealmente con transposición del doble enlace.

La obtención del caucho natural sintético o poliisopreno (IR), se consiguió en 1954 gracias al desarrollo de los catalizadores estereoespecíficos. Actualmente se emplean dos técnicas para la fabricación industrial del poliisopreno: la polimerización con catalizadores Ziegler-Natta (de coordinación) y la polimerización (aniónica) con alquil-litio. Ambas técnicas requieren el empleo de productos muy puros y esto, unido al elevado coste de fabricación del isopreno monómero, hace que el poliisopreno sintético resulte poco competitivo frente al caucho natural.

Sus aplicaciones son similares a las del caucho natural pero su nivel de utilización es muy inferior debido a su mayor precio.

Los cauchos de polibutadieno (BR) ocupan actualmente el segundo lugar, en cuanto a volumen de consumo, entre los cauchos sintéticos. Los primeros cauchos fabricados a escala industrial (1920-1930) se obtuvieron por polimerización en masa iniciada con sodio metálico y denominaron cauchos BUNA. Sus propiedades no eran satisfactorias, debido al bajo contenido de estructuras cis-1,4.

Actualmente los cauchos BR se sintetizan por polimerización en disolución y existen muchos tipos comerciales que pueden clasificarse en dos grandes grupos: el BR de alto contenido (93-97%) de estructuras cis-1,4, preparado con catalizadores de coordinación, y el BR de medio contenido (35%), preparado con catalizadores de alquil-litio.

Estos cauchos tienen muy buenas propiedades mecánicas pero se trabajan con grandes dificultades, por lo que se mezclan normalmente con caucho natural y otros elastómeros sintéticos para que la mezcla no pierda cohesión y se desmenuce. Características distintivas de los vulcanizados de BR son su elevada resiliencia y su resistencia al frío debida a la baja temperatura de transición vítrea que tiene el polibutadieno cis-1,4. Por sus buenas propiedades mecánicas de resiliencia y resistencia a la abrasión y a la aparición de grietas son sumamente interesantes para la sustitución parcial del SBR o del caucho natural en las cubiertas de neumáticos.

2. COMPORTAMIENTO EN SERVICIO DE LOS NUEVOS MATERIALES

2.1. Introducción

Para un técnico de la construcción, la puesta en servicio y las propiedades de los materiales a largo plazo son tan importantes como la propiedades mecánicas; de hecho las características de un material en servicio a largo plazo están ínter-relacionadas con sus propiedades mecánicas.

La durabilidad es un aspecto relacionado con la mayoría de propiedades físicas, mecánicas y estéticas y es por esto una de las cualidades más importantes a considerar en el uso de polímeros en el exterior de los edificios. Es necesario que los polímeros muestren un grado de resistencia a la acción degradante del clima, y aunque la mayoría de los polímeros son, en cierto grado, químicamente inertes, sus superficies y propiedades mecánicas deben ser correctamente diseñadas. Los arquitectos ven la "suavidad" de los materiales tradicionales como una ventaja estética pero desean que los polímeros mantengan su primitiva condición de conseguir efectos singulares. Para el usuario, el cambio en la apariencia es a menudo la forma más significativa de deterioro, pero las propiedades estéticas y los límites de aceptabilidad son lo más difícil de definir.

El capítulo está dividido en dos partes. En primer lugar, se estudian aspectos relacionados con el proyecto de un componente en materiales compuestos. La aplicabilidad, procesos de fabricación, el diseño de materiales compuestos y el control de calidad serán aspectos tratados en esta primera parte. En segundo lugar se abordarán diferentes cuestiones relativas al comportamiento de los materiales en servicio. Se estudiará el comportamiento al fuego de los materiales poliméricos, así como las distintas soluciones para mejorar la respuesta de estos materiales ante problemas de propagación de llama y humos. Se tratarán también las propiedades térmicas y químicas, insonorización, transmisión de luz y resistencia a la abrasión, durabilidad y sistemas de reparación.

La industria de la construcción es el segundo mayor usuario de materiales compuestos de plásticos reforzados convencionales. La mayor parte de estos productos son de materiales compuestos convencionales y se usan para aplicaciones no estructurales. Las tuberías y los paneles de mat corrugado constituyen aproximadamente el 65% de dichas aplicaciones. El propósito de este capítulo es ocuparse de las aplicaciones estructurales de los materiales compuestos avanzados en esta industria.

Un material compuesto se define como aquel conformado por distintos constituyentes destinados a realizar una función que ninguno de ellos puede realizar individualmente. Los laminados de mat y tejidos de roving como los usados en cámaras rociadoras y placas y paneles corrugados son ejemplos de plásticos reforzados convencionales. Un material compuesto avanzado es aquél en el que el refuerzo está ventajosamente colocado en el interior de la sección para mejorar sus características y además está instalado para optimizar el diseño y las propiedades mecánicas de la estructura para una previsible utilización a corto y largo plazo. Puede consistir en una mezcla de diferentes formas de refuerzo para superar tensiones internas, con un resultado final de una rigidez razonable y una elevada resistencia.

Consiste, además, en elementos seleccionados que tienen una sustancial elongación (mayor que el refuerzo de fibra) para obtener más altos niveles de tensión media. Podemos decir que un material compuesto avanzado es aquél que está compuesto de las mismas materias primas que su material compuesto convencional correspondiente pero, por una adecuada colocación del refuerzo, desarrolla una sustancial mejora en su comportamiento. Un panel de material compuesto avanzado, por ejemplo, presenta un comportamiento equivalente a un panel de acero.

En este capítulo nos referiremos sólo al refuerzo de fibra de vidrio en los materiales compuestos porque este material presenta la más alta relación resistencia y rigidez/coste; buena estabilidad dimensional, propiedades eléctricas y resistencia a la corrosión; facilidad de manipulación en la fabricación; y propiedades mecánicas fiables para un comportamiento predecible del material compuesto. El elevado coste de las fibras de aramida, carbono o boro usadas como refuerzo hace que se utilicen únicamente para edificios y construcciones donde las variables de resistencia y rigidez/peso sean críticas.

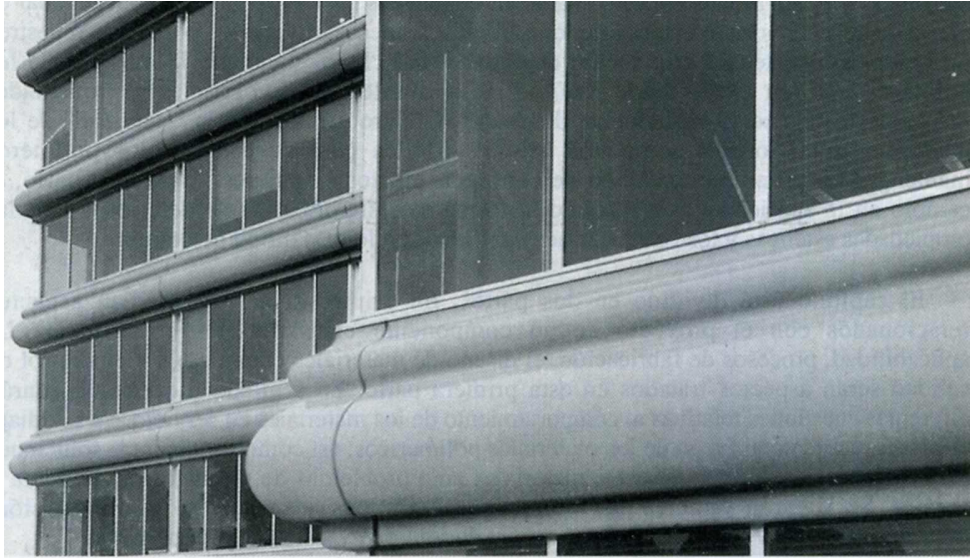


Figura 2.1. Fachada de paneles de fibra de vidrio y resina de poliéster. Una de sus importantes características es su durabilidad y resistencia ante condiciones ambientales

2.2. Aplicabilidad de plásticos avanzados reforzados con fibras

Existe un profundo deseo de utilizar plásticos reforzados con fibras para edificaciones y componentes de construcción, por ejemplo, revestimientos, elementos estructurales y construcciones integrales dados los requerimientos que surgen a partir de aplicaciones especiales como las implantadas en ambientes corrosivos o equipos de microondas para servicios. En aplicaciones generales, no obstante, las industrias se muestran todavía reticentes a utilizarlos como un material de carga permanente para componentes estructurales del mismo modo que aceptan el acero, cemento, manipostería o madera. Esto es debido a que los arquitectos, ingenieros y diseñadores han sido formados principalmente con materiales elásticos convencionales, en los que se basan las ecuaciones de diseño, especificaciones y normas de construcción.

El excepcional comportamiento y el precio competitivo de los materiales compuestos para aplicaciones en la construcción han sido obtenidos gracias al uso de tejido de vidrio unidireccional (UDR) y sistemas de resina compatible, y a una adecuada selección del proceso de fabricación. Aplicaciones recientes han hecho uso de materiales compuestos avanzados como estructuras capaces de resistir cargas permanentes de considerable magnitud.

Los materiales compuestos avanzados poseen características atractivas añadidas a sus propiedades estructurales, que aumentan la efectividad de los materiales. Actualmente, la resistencia a la corrosión es el principal motivo para la selección de materiales compuestos. Su gran resistencia y bajo peso son cada vez más importantes cuando es esencial conservar energía para unidades transportables. La transparencia electromagnética es una característica esencial para aplicaciones con microondas. La ausencia de interferencias electromagnéticas para equipos eléctricos de experimentación. La transmisión de la luz y la translucidez son componentes importantes para claraboyas, atrios, equipos de tratamiento de aguas residuales, etc. Los materiales compuestos avanzados pueden modelarse con cualquier forma para una eficiente distribución de la tensión, la rigidez y otros parámetros. Muestran un alto grado de elongación elástica y resiliencia; es más, las piezas estructurales pueden soportar una gran deformación antes de llegar a la rotura. Pueden ser reparados y restaurados "in situ" con una mínima interrupción de operaciones. Dichas estructuras pueden fabricarse por simple ensamblaje, con mínimos requerimientos de pintado y moderado coste en utillaje.

1.3. Fabricación de materiales compuestos avanzados

Las materias primas básicas para el material compuesto avanzado son fabricadas por grandes compañías que se encuentran entre las 500 industrias más importantes del planeta; >or el contrario, en general, los fabricantes de los

productos finales tienden a ser pequeñas y medianas empresas.

Los poliésteres se encuentran entre las resinas existentes de más bajo coste y se usan extensamente en el PRFV para aplicaciones estructurales de construcción industrial que requieren resistencia a la corrosión a temperaturas por debajo de los 60° C. Los vinilésteres tienen una superior resistencia y retención de la rigidez a temperaturas elevadas de hasta 100° C, resistencia química superior y elongación del 4% para compatibilidad con fibras de vidrio reforzantes.

Se suelen añadir aditivos a la resina para transferirle determinadas propiedades, pero pueden tener efectos negativos sobre sus propiedades mecánicas y otras propiedades físicas. Los aditivos más comúnmente utilizados son retardantes de llama y cargas. Los retardantes de llama se utilizan para reducir la propagación del fuego, pero puede causar problemas, entre ellos la reducción en la resistencia a la corrosión, la resistencia, la rigidez / la estabilidad ante rayos ultravioleta (UV). Las cargas se añaden para mejorar propiedades tales como la rigidez, resistencia al impacto, retardación de llama y reducción de la contracción durante el curado, así como para reducir el coste de la unidad.

Los procesos de fabricación para plásticos reforzados con fibra dependen de su función, tamaño, cantidad, tasa de producción, acabado y consideraciones de coste. Los más usados son: contacto, laminado continuo, transferencia de resina y pultrusión.

El contacto es el más simple y versátil proceso de fabricación, pero la producción mediante este método es relativamente lenta y la calidad depende de la pericia de los Operarios. El contacto tiene la ventaja de una casi completa libertad en la colocación de la fibra y en el corte de la sección transversal. También es fácil fabricar secciones muy delgadas. El laminado continuo es un proceso apropiado para un alto volumen de producción de chapas corrugadas de cualquier longitud pero con un espesor máximo limitado.

La transferencia de resina es un proceso de molde cerrado apropiado para formas estructurales complejas que requieren un buen comportamiento y buen acabado superficial. La pultrusión es ideal para piezas que tienen una sección transversal constante, tales como perfiles, celosías, postes, varillas, secciones tubulares y paneles. Mediante esta técnica pueden obtenerse dimensiones precisas, así como una alta resistencia longitudinal y rigidez, existiendo la mayor dificultad en las uniones, que pueden ser atornilladas, remachadas o por adhesivo. La fabricación de una estructura completa puede requerir todos los procesos mencionados con el fin de obtener la máxima economía y el mejor comportamiento.

2.4. Diseño estructural con materiales compuestos avanzados.

Los materiales compuestos avanzados son heterogéneos, anisótropos y viscoelásticos. Se fabrican a partir de una gran variedad de composiciones posibles y mediante numerosos procesos de fabricación con grados de precisión variables. Consecuentemente, el diseñador tiene la responsabilidad de analizar los efectos de las situaciones de tensión que van más allá de la resistencia estática básica y llevar a cabo los cálculos de rigidez requeridos para materiales convencionales como el acero y el cemento.

Tales condiciones (una infinita variedad de configuraciones materiales) han creado una situación que permite optimizar la disposición de fibras y matrices, o lo que es lo mismo diseñar materiales "a la carta". En la actualidad, existen programas comerciales que funcionan en ordenadores personales y que permiten en muy pocos segundos, determinar el comportamiento estructural de los materiales compuestos en términos de rigidez y resistencia.

2.5. Consideraciones y especificaciones de diseño.

El material compuesto avanzado para una aplicación estructural de carga a largo plazo requiere integridad y durabilidad estructural. Las láminas interiores de las fibras reforzantes están diseñadas de acuerdo a los requerimientos de carga y servicio y satisfacen los requerimientos de integridad estructural. Las láminas exteriores son capas protectoras de los UV o una lámina rica en resina que resista la corrosión y el desgaste, y se colocan ahí para satisfacer el requerimiento de durabilidad.

Los factores que deben tenerse en cuenta al evaluar un material compuesto y que deben utilizarse para preparar la especificación para una aplicación estructural incluyen la identificación de funciones del componente estructuralmente y otros requerimientos, así como las características químicas, térmicas, eléctricas y estéticas. A continuación, deben ser evaluados los siguientes factores:

- Naturaleza de la carga. Las propiedades de resistencia y rigidez del PRFV dependen de si la carga aplicada es intermitente, cíclica, de impacto o sostenida. El modo de rotura, que varía directamente con las resistencias al pandeo últimas, está asociado estrechamente con el tipo y la duración de la carga.
- Condiciones ambientales. Los ambientes de servicio, como la radiación de UV, el desgaste, los elementos químicos agresivos y la temperatura elevada tienen efectos deletéreos en el comportamiento de la estructura diseñada. Las propiedades relevantes han de ser reducidas adecuadamente.
- Duración o vida de la pieza. La vida del componente es un parámetro importante al determinar los valores del diseño debido a la relación entre el coeficiente de seguridad donde se incluyen factores de envejecimiento y la vida de la pieza.
- Factor de seguridad. El factor parcial de seguridad para materiales se aplica para reducir los valores esperados de resistencia y rigidez que pueden surgir a causa de variaciones en los materiales o la fabricación. El factor parcial de seguridad para cargas (o factor de carga) se aplica a los probables aumentos de carga sobre los valores esperados basados en el grado de certeza en la estimación de la carga.
- Condiciones de servicio. Las condiciones de servicio deben ser tenidas en cuenta en el diseño de materiales compuestos avanzados porque son las condiciones límite que se esperan durante el período de operación de la estructura. Incluyen la máxima deformación, basada en una fracción de la longitud de la pieza o en valores absolutos; el pandeo global sin daño y el pandeo local de partes delgadas de la estructura resultante de tensiones temporales o prolongadas; microfractura y agrietamiento, que pueden indicar un posible deterioro en el comportamiento de la pieza.

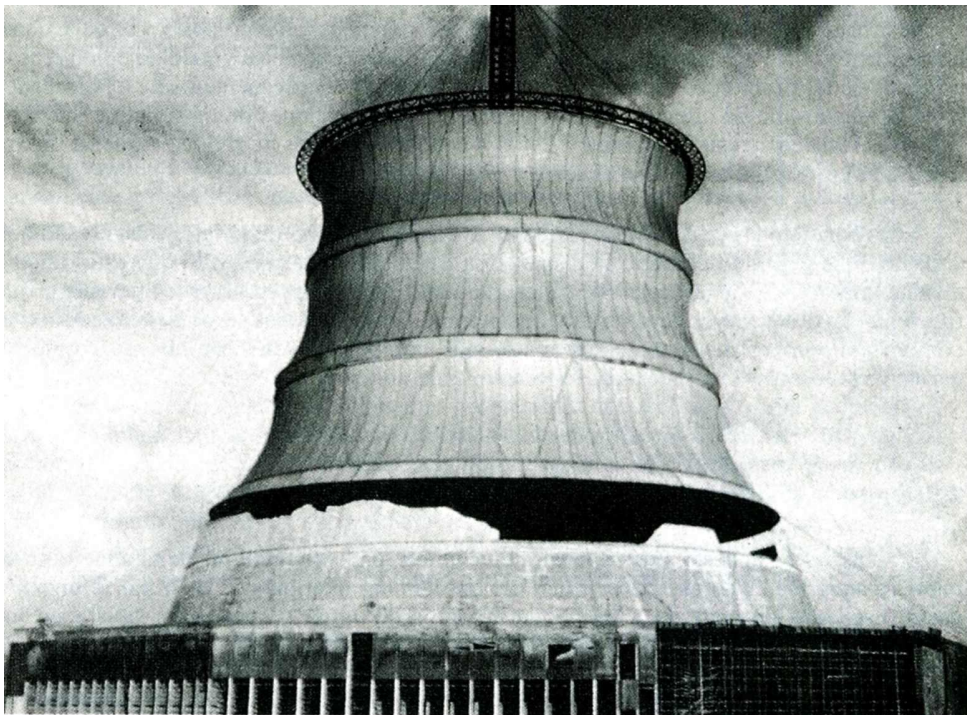


Figura 2.2. Torre de refrigeración metalotextil donde se incorpora un tejido de poliéster y PVC en Bouchain, Francia. Este caso es destacable por sus restrictivas especificaciones de diseño.

2.6. Diseño de componentes estructurales de PRF.

La preparación de especificaciones es el primer paso en el proceso de diseño. Las especificaciones de la pieza son descritas para establecer los estándares para niveles aceptables de comportamiento y control de calidad.

Para diseñar piezas y estructuras utilizando materiales compuestos avanzados se deben emplear los constituyentes apropiados colocados del modo más favorable. Se obtiene un comportamiento óptimo a partir de la combinación adecuada de cuatro factores críticos: forma, refuerzo, resina y proceso.

Forma: Primero hay que considerar el tamaño de la pieza para soportar las cargas y, a continuación, el diseño de la sección transversal para mantener su forma. Esto requiere colocar los elementos reforzantes (el constituyente primario de soporte de carga) en una posición relevante para aprovechar su superior resistencia y rigidez.

La forma ha de ser diseñada no sólo para satisfacer los requerimientos geométricos de su función, sino también para proporcionar rigidez y resistencia inherentes. Por ejemplo, una estructura tipo cajón es más estable que una viga en I. Las formas tubulares proporcionan los valores óptimos en términos de inercia por concentración de material a lo largo del perímetro, dando el máximo radio de giro para un área de sección transversal dada.

Refuerzo: El sistema de refuerzo debe elegirse para proporcionar el máximo espesor y resistencia, tan alejados del eje neutro como sea posible para aumentar la inercia y módulo resistente específicos. El refuerzo puede tomar muchas formas: tejido, unidireccional, combinaciones, mat. Es necesario determinar el emplazamiento del refuerzo y su porcentaje respecto al material polimérico. Este paso es más importante puesto que es imperativo para determinar la cantidad de fibra adecuada para asegurar una resistencia y rigidez dadas. Esto es comparable con la barra de refuerzo de acero utilizada en estructuras de hormigón armado.

Resina: La resina utilizada puede tener requerimientos especiales, como retardancia al fuego, resistencia química y/o resistencia a los UV. Las cualidades de las que debe dotarse al material compuesto están determinadas por el uso que se le quiera dar al producto final. Las superficies y velos ricos en resina son utilizados para aumentar la durabilidad.

Proceso: Una vez que los tres factores anteriores han sido decididos, puede ser considerado el proceso de fabricación. El proceso dependerá de la configuración de la pieza y de las cantidades de producción necesarias.

Estos cuatro factores deben ser cuidadosamente tenidos en cuenta para obtener el comportamiento óptimo del producto. No obstante, esto es difícil si no se conocen los tipos y espesores de los materiales reforzantes disponibles, el tipo de formas que pueden ser utilizadas o si existe un proceso de fabricación aceptable. Una consulta con un diseñador o fabricante de confianza puede ser de interés para diseñar un producto que cumpla las especificaciones y proporcione el coste óptimo. Encontrar una empresa familiarizada con estos materiales nos ayudará a utilizarlos con el máximo provecho.

2.7. Especificación y control de calidad

El procedimiento para controlar el rendimiento de un producto es conocido como control de calidad; la calidad de un producto terminado dependerá por ello de esta garantía. Para estar seguros de que los componentes cumplen todos los requerimientos necesarios, es esencial una especificación que cubra todos los aspectos de ejecución y para asegurarse de que el producto final cumple esta especificación, que debe incluir:

- calidad de las materias primas;
- un diseño adecuado de todos los componentes;
- un plan de trabajo suficientemente detallado y consistente con los requerimientos de diseño para la fabricación de los componentes terminados.

Ya que hay varios procedimientos de fabricación diferentes para los polímeros reforzados con vidrio como moldeo en prensa, manual, pultrusión, enrollamiento continuo, etc., los problemas de control de calidad también son diferentes. Una vez se ha establecido el producto, el diseño de la herramienta y las técnicas de operación, las etapas automáticas en una prensa caliente de moldeo implican menos problemas en el control de calidad que las técnicas de

contacto y rociado, que se llevan a cabo en condiciones ambientales y en moldes abiertos con muy poca o nula mecanización.

El control de calidad para el moldeo de polímeros reforzados está contemplado en la norma BS 4549 (no existe norma ISO equivalente) y está basado en criterios de ejecución. Este control debe ser valorado mediante un programa de ensayos. Probablemente la parte más importante de la norma BS 4549 es la Parte 1 que trata de moldeados de mats, o de fibra de vidrio depositada aleatoriamente. Este material se discute en detalle como ejemplo de estos tipos de especificaciones.

- **Materiales:** Si las especificaciones de los materiales tienen que cumplir la especificación BS, los distribuidores deben garantizar que el material la cumpla.
- **Selección de las probetas y frecuencia de ensayo:** Las probetas de ensayo para la valoración de dureza y residuo de ignición deben ser tomadas de materiales compuestos reales. Para otros ensayos, son suficientes probetas con idéntico proceso de fabricación. Se debe seleccionar un número adecuado de muestras para que sean representativas de la calidad del producto y realizar los ensayos apropiados.
- **Examen previo:** Cada componente debe ser examinado visualmente para encontrar defectos tales como fibras que sobresalen, poros, erosiones y grietas, vacíos, burbujas, áreas con abundancia o escasez de resina, superficies pegajosas y presencia de materias extrañas.
- **Dimensiones:** El arquitecto y el fabricante deben ponerse de acuerdo en lo que se refiere a la tolerancia de las dimensiones de los componentes. Las tolerancias para el espesor de un material compuesto están dadas en la Tabla 2.1 (Tabla 1 de la norma BS 4549, Parte 1).
- **Contenido en vidrio:** Si el contenido en vidrio nominal está especificado como N%, la variación debe ser entre (N-2.5)% y (N+7.5)%. Si durante la fabricación de un material compuesto, no se usan rellenos minerales, el residuo de la ignición puede servir como control rápido del contenido de vidrio. Alternativamente, si se usa rellenos minerales, la norma BS 2782 Determinación de pérdida por ignición, Parte 10: Método 1002 (norma equivalente EN60 ≠ ISO 1172) se puede usar como base para determinar el contenido en vidrio.

Tabla 2.1 Tolerancia para diferentes valores de espesor de Materiales Compuestos

Espesor nominal en mm.	Molde abierto	Molde cerrado
$e < 1,5$	- 0.25 + 0.50	±0.20
$1.5 \leq e < 3$	±0.75	±0.30
$3 \leq e < 6$	±1.1	±0.50
$6 \leq e < 12$	+ 1.5	±0.75
$12 \leq e < 25$	±2.0	±1.4
$e \geq 25$	±3.0	±1.9

- **Grado de curado.** El grado de curado de un material compuesto puede estimarse por la dureza Barcol del material. El valor mínimo debería ser al menos 90% del valor Barcol especificado por el fabricante de resina. El valor Barcol depende de la temperatura y por tanto debe especificarse la prueba de temperatura con una tolerancia de $\pm 2^\circ\text{C}$ sobre los valores mínimos Barcol para un rango de temperaturas. En algunos casos, puede ser necesario determinar la dureza del gel-coat.

Nótese que los requerimientos de BS 4549, Parte 1 no son siempre satisfechos, particularmente en el proceso de moldeo abierto. Algunos fabricantes tienen dificultades en satisfacer las tolerancias para el espesor del material compuesto y para la variación del contenido en vidrio.

2.8. Comportamiento al fuego

El comportamiento al fuego de los materiales se divide en dos grandes grupos:

- la resistencia al fuego,
- la reacción al fuego.

La resistencia al fuego se aplica a materiales que, sometidos a la acción de una curva Tiempo-Temperatura normalizada, mantienen sus características estructurales (puede decirse que "no se caen"). Estas características estructurales son: capacidad portante, aislamiento de la temperatura y no emisión de gases inflamables. En esa curva normalizada los 500°C se alcanzan en 5 minutos, de manera que la resistencia al fuego es difícilmente aplicable a materiales de base polimérica.

La reacción al fuego se define como "el comportamiento de un material frente al fuego al que está expuesto y al que alimenta". Los parámetros que se emplean para definir (mejor, para valorar o cuantificar) la reacción al fuego son: la facilidad de encendido, la velocidad de propagación superficial, la cantidad de calor desprendido (unitario: en función del tiempo, lo que se suele llamar "rate") y la emisión de gases y humos.

Cada país tiene su propia normativa de reacción al fuego, recogida en sus legislaciones nacionales (por ejemplo, España, la UNE Alemania, la DIN y Gran Bretaña, la BS). La CEE intentó tener una unificación del tema para 1993, pero fracasó y no es probable que antes de diez años se consiga.

En Estados Unidos el tema no es más claro, ya que cada estado tiene autoridad sobre el tema y hay 50 normativas y, como es habitual, el estado de California y la ciudad de Nueva York son de los más avanzados en el país, aunque el caos es también enorme.

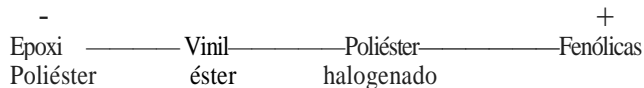
Empleando materiales de PRF, la clasificación la obtiene el producto terminado como es habitual. Una valoración rápida del papel que cada componente juega en la reacción al fuego sería la siguiente:

1. Contenido en resina.

Para mejorar el comportamiento al fuego debe reducirse el contenido en resina. Esta reducción tiene como límite las propiedades mecánica y química de la pieza.

2. Tipo de resina.

El tipo de resina afecta en gran medida el comportamiento del material compuesto al fuego. Como se aprecia en el siguiente esquema, la mejor resina desde el punto de vista de emisión de humos es la fenólica, siguiéndole el poliéster halogenado, el viniléster y finalmente el epoxi y el poliéster sin halógenos.



En general, las matrices termoplásticas corrientes son peores que las resinas de epoxi y poliéster, excepto los Polímeros aromáticos tipo PEK, PEEK, PSV, PAI, etc...

3. Contenido en fibras.

Todo lo que reduzca el contenido de resina favorece la respuesta al fuego, por lo que se debe aumentar el contenido en fibra. Límites: características mecánicas y características de fabricación.

4. Tipo de fibra

El tipo de fibra afecta en gran medida el comportamiento del material compuesto al fuego. Como se aprecia en el siguiente esquema, la mejor fibra es la de vidrio, siguiéndole el carbono y finalmente la aramida (kevlar o twaron)



La Dynema, que es un polietileno, estaría todavía más a la izquierda.

5. Contenido en cargas.

Como las fibras. Todo lo que elimina resina es favorable. También hay límites.

6. Tipo de cargas.

- 6.1. De relleno. Co_3Ca , arena. Actúan de modo pasivo, reduciendo el porcentaje de resina (también los hay combustibles, como el serrín).
- 6.2. Ignifugantes. Sb_2O_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$. Actúan de modo activo y pasivo. Reducen la resina y emiten gases que disminuyen la inflamabilidad de la lámina.

7. Otras consideraciones.

En general, el espesor paraliza la propagación, pero depende también del tipo de ensayo concreto que se aplique. Para poliésteres, por ejemplo, el grado de curado y el porcentaje de estireno residual influyen y es necesario poscurar las piezas obligatoriamente para mejorar u optimizar la calificación a obtener.

Una de las preocupaciones principales de los arquitectos e ingenieros que utilizan polímeros en la industria de la construcción es el problema asociado al fuego. Como los materiales polímeros están compuestos de átomos de carbono, hidrógeno y nitrógeno (es decir son materiales orgánicos), son inflamables en distinto grado. Es posible, sin embargo, incorporar aditivos en las formulaciones de resina o alterar su estructura, modificando así su comportamiento y creando un material compuesto con mejores propiedades ante el fuego.

El comportamiento inflamable de los materiales progresa pasando por cinco estadios diferentes: ignición, desarrollo, extensión, quemado completo y decadencia; el primer estadio es la reacción térmica al fuego y comprende la inflamación, extensión de la llama, liberación del calor y producción de humo y gases tóxicos. La resistencia al fuego de un elemento de construcción se mide por su capacidad para confinar el fuego en un compartimento manteniendo estable la parte no afectada de la estructura. Los requerimientos de resistencia al fuego de diferentes elementos de un edificio están por lo tanto relacionados con la cantidad de material de combustión presente en el compartimento, su función y su posición relativa a los límites del edificio.

2.8.1 Clasificación de materiales al fuego

Los materiales se clasifican en las clases siguientes: M-1, M-2, M-3, M-4 y, si se presenta el caso, M-0.

La clasificación, dentro de las clases M-1 a M-4, de los materiales flexibles de espesor inferior o igual a 5 mm, se determina, según las condiciones definidas a continuación, en función de los resultados obtenidos en el ensayo principal de la norma UNE 23-723 y, eventualmente, en los ensayos complementarios de las normas UNE 23-724 y UNE 23-725.

Un material flexible se clasifica M-1 cuando en los ensayos se han obtenido los resultados siguientes:

- a) Ensayo en el quemador eléctrico (véase UNE 23-723)

En el transcurso del ensayo no hay inflamación de duración superior a 5 s después de retirar la llama piloto, ni

puntos de ignición con efecto de propagación, ni caída de gotas.

La eventual inflamación del residuo carbonizado no debe tenerse en cuenta. Si hay caída de gotas inflamadas o sin inflamar, se procede al ensayo para materiales fusibles.

b) Ensayo para materiales fusibles (véase UNE 23-725)

Si se produce inflamación de la guata de celulosa, el material se clasifica M-4. En caso contrario, el material se clasifica M-1 en el ensayo en el quemador eléctrico ha habido caída de gotas no inflamadas y M-2 si ha habido caída de gotas inflamadas.

c) Si en el curso del ensayo en el quemador eléctrico hay perforación del material antes de 20 s, de manera que la llama piloto no puede llegar a ponerse en contacto con el material, éste se clasifica de acuerdo con el apartado 3.3.1

Un material flexible se clasifica M-2 cuando:

1) No entra dentro de la clase anterior.

2) En los ensayos se han obtenido los resultados siguientes:

a) Ensayo en el quemador eléctrico

Las inflamaciones persistentes, espontáneas o provocadas, producen una destrucción tal que la media de las longitudes destruidas, medidas a partir del borde inferior de la probeta, es inferior a 350 mm.

Si hay caída de gotas inflamadas o sin inflamar, se procede al ensayo para materiales fusibles.

b) Ensayo para materiales fusibles

Si se produce inflamación de la guata de celulosa, el material se clasifica M-4. En caso contrario, el material se clasifica M-2 si en el ensayo en el quemador eléctrico ha habido caída de gotas no inflamadas y M-3 si ha habido caída de gotas inflamadas.

Un material flexible se clasifica M-3 cuando:

1) No entra dentro de las clases anteriores;

2) En los ensayos se han obtenido los resultados siguientes:

a) Ensayo en el quemador eléctrico

Las inflamaciones producen una destrucción tal que la media de las longitudes destruidas, medidas a partir del borde inferior de la probeta, es inferior a 600 mm y que la media de las anchuras destruidas es inferior a 90 mm en la zona de la probeta comprendida entre 450 mm y 600 mm de su borde inferior. Si hay caída de gotas inflamadas o sin inflamar se procede al ensayo para materiales fusibles.

b) Ensayo para materiales fusibles

Si se produce inflamación de la guata de celulosa el material se clasifica M-4. En caso contrario, el material se clasifica M-3 si en el ensayo en el quemador eléctrico ha habido caída de gotas no inflamadas y M-4 si ha habido caída de gotas inflamadas.

Un material flexible se clasifica M-4 cuando:

1) No entra dentro de las clases anteriores

2) En el ensayo descrito en la norma UNE 23-724, la velocidad de propagación de la llama es inferior a 2 mm/s.

La clasificación, dentro de las clases M-1 a M-4, de los materiales flexibles de un espesor superior a 5 mm y de los materiales rígidos, se determina, según las condiciones definidas a continuación, en función de los resultados obtenidos en el ensayo principal de la norma UNE 23-721 y, eventualmente, en los ensayos complementarios de las normas UNE 23-724 Y UNE 23-725.

En el caso de perforación rápida sin inflamación de los materiales durante el curso del ensayo por radiación, se procede a los ensayos complementarios para materiales fusibles y de propagación de la llama, con exclusión de los revestimientos de suelos, sea cual sea su forma de colocación, y los revestimientos murales pegados. Los criterios seguidos para la clasificación de los materiales, después del ensayo por radiación, se basan en los índices siguientes: inflamabilidad, desarrollo de las llamas, longitud máxima de las llamas y combustibilidad.

Se llama índice de inflamabilidad "i" a la expresión:

$$i = \frac{1000}{t_1 + t_2} \sim 15t_1 + 15t_2$$

donde t_1 y t_2 son los tiempos de inflamación, en segundos, de cada una de las dos caras; si no hay inflamación sobre una de las dos caras el tiempo correspondiente se considera como infinito.

Se denomina índice de desarrollo de las llamas "s" al valor resultante de dividir por 140 la suma de las longitudes máximas, en centímetros, alcanzadas por las llamas en el curso de cada medio minuto durante la duración del ensayo.

Este índice interviene en la clasificación con los valores límites siguientes:

$$\begin{aligned}s &= 0,20 \\ s &= 1,0 \\ s &= 5,0\end{aligned}$$

Se denomina índice de la longitud máxima de la llama "h" a la vigésima parte de la mayor de las longitudes máximas parciales 1) expresadas en centímetros.

Se denomina índice de combustibilidad "c" al valor resultante de dividir por 120 el área algebraica, expresada en grados centígrados por minuto, comprendida entre la curva de las variaciones de temperatura indicadas por los termopares durante la duración del ensayo y la recta de temperatura media obtenida cuando el radiador está en régimen térmico estacionario y los dispositivos de inflamación en funcionamiento.

Los índices resultantes para la clasificación del material son las medias aritméticas respectivas de los índices obtenidos en el transcurso del ensayo de cada una de las probetas.

Un material flexible de espesor superior a 5 mm o un material rígido se clasifica M-1 cuando los tres índices "i", "s" y "h" son nulos, es decir, cuando no hay ninguna inflamación efectiva en las cuatro probetas y, además, el índice "c" es inferior a 1.

Un material flexible de espesor superior a 5 mm o un material rígido se clasifica M-2 cuando:

- 1) No entra dentro de la clase anterior;
- 2) Los índices toman los siguientes valores:
 - a) "s" es inferior a 0,20; "h" y "c" son inferiores a 1; "i" tiene un valor cualquiera, o

b) los cuatro índices son inferiores a 1

Un material flexible de espesor superior a 5 mm o un material rígido se clasifica M-3 cuando:

- 1) No entra dentro de las clases anteriores;
- 2) Los índices toman los siguientes valores:
 - a) "s" es inferior a 1; "h" es inferior a 1,5; "c" es inferior a 1; "i" es cualquiera, o
 - b) "s" es inferior a 5; "h" es inferior a 2,5; "c" es inferior a 2,5; "i" es inferior a 2.

Un material flexible de espesor superior a 5 mm o un material rígido se clasifica M-4 cuando:

- 1) No entra dentro de las clases anteriores.
- 2) Después del ensayo descrito en la norma UNE 23-724, la velocidad de propagación de la llama es inferior a 2 mm/s.

Los revestimientos de suelos se clasifican de la siguiente forma:

- 1) Después del ensayo en el panel radiante (véase la norma UNE 23-726), se clasifica M-3 si, después de la extinción de la probeta, la media de las tres longitudes máximas recorridas por el frente de llamas es inferior o igual a 300 mm.
- 2) Después del ensayo en el panel radiante (véase UNE 23-726), se clasifica M-4 si, después de la extinción de la probeta, la media de las tres longitudes máximas recorridas por el frente de llamas es superior a 300 mm, y si la media de las tres longitudes al final del primer minuto del ensayo es inferior o igual a 100 mm.
- 3) Después del ensayo por radiación (véase UNE 23-721) se obtiene una clasificación M-1 o M-2.

Los materiales multicapa (tipo sandwich) con capas exteriores incombustibles estancas, según el apartado 3.6 de la norma UNE 23-730, y después del ensayo por radiación, se clasifican de la siguiente forma: ^^

- 1) M-1, si los gases desprendidos por la junta simulada no se inflaman en ninguna de las cuatro probetas.
- 2) M-2, si los gases desprendidos por la junta simulada se inflaman.

La clasificación del material multicapa no puede ser peor que la del alma (núcleo) (en el caso de materiales de núcleo clasificados M-1)

La clasificación del material multicapa no puede ser mejor que la de la capa exterior (en el caso de "paramentos" con revestimientos gruesos clasificados M-3).

Si el paramento incombustible estanco tiene un espesor inferior a 0,2 mm en el caso del aluminio y a 0,1 mm en el caso del cobre, y si el alma (núcleo) del material multicapa está clasificado M-4, la clasificación del material multicapa se mantiene como M-4.

Clasificación M-0

Para que un material sea clasificado M-0, deberá cumplir lo siguiente:

- 1) Todo material rígido o flexible y de cualquier espesor, antes de ser sometido al ensayo para la clasificación M-0, deberá haber obtenido la clasificación M-1 conforme a los ensayos correspondientes.

La norma de ensayo para la clasificación de M-0 es la norma UNE 23-102



Figura 2.3. Techo de yeso reforzado con fibra de vidrio cuya clasificación ante el fuego es M-0.

Las Building Regulations aconsejan que dependiendo del uso, los elementos ó estructuras de construcción deberían estar conformes con los modelos dados de seguridad ante el fuego. Los ensayos de comportamiento al fuego están divididos en dos categorías:

- reacción ante el fuego: ensayo de materiales
- resistencia al fuego: ensayos de estructuras

Estos ensayos están explicados en la norma BS 476 Partes 4,5,6 y 7 y Partes 3 y 8, respectivamente (la Parte 3 cubre los ensayos de tejados);(esta referencia da importancia a British Standard Specifications e indica las normas equivalentes a ISO). Es evidente que el comportamiento de los materiales compuestos ante el fuego depende de diferentes factores como:

- facilidad de ignición
- propagación superficial de la llama
- penetración del fuego

Existen muchos ensayos para medir el comportamiento ante el fuego y la mayoría de los países tienen métodos particulares, a menudo requieren muestras de grandes probetas y equipamiento especial; en la sección siguiente se muestran algunos de los ensayos que se realizan en el Reino Unido.

2.8.2 Reacción al fuego: ensayo en materiales

2.8.2.1. Ensayo de incombustibilidad en materiales

En la norma BS 4 476 Parte 4 1970 (1984) se define la incombustibilidad y se investiga si el material, con o sin revestimiento, cumple la definición. En estos ensayos una muestra cúbica con acoplamiento térmico se coloca en un horno a 750°C. La muestra no debería flamear más de 10 segundos o superar la temperatura del horno más de 50°C. Los polímeros que tengan normalmente más de un 4% de contenido orgánico no es probable que cumplan estas condiciones.

2.8.2.2. Método de ensayo de inflamabilidad

La norma BS 476 Parte 5 (1979) discute la facilidad con la que un material se inflamará (especialmente las condiciones al comienzo del fuego). Una llama de 10 mm es dirigida al centro de una probeta vertical, pero debe decirse que la realización solamente de este ensayo no determina la inflamabilidad del polímero.

2.8.2.3. Método de ensayo de propagación del fuego

La norma BS 476 Parte 6 1981 (1989) discute el ensayo que debe hacerse para medir la inflamabilidad, las características térmicas y el grado al que el calor se libera de la probeta. Se montan probetas tipo de 2280 mm² y espesor nominal no mayor de 50 mm como lado vertical de un horno cúbico no combustible. Inicialmente la probeta se somete a una intensidad de calor de 1.8 kW y pasados 2.75 minutos, se aumenta la intensidad a 1.5 kW para un ensayo de 20 minutos de duración.

Tabla 2.2. Clasificación para el ensayo de propagación de llama.

Propagación de llama a 1.5 min.	Propagación de llama a 10 minutos	Clasificación
Hasta 165 mm; tolerancia en una probeta 25 mm.	Hasta 165 mm; tolerancia en una probeta 25 mm.	Clase 1
		Clase 2
		Clase 3
Hasta 251 mm; tolerancia en una probeta 25 mm.	Hasta 455 mm; tolerancia en una probeta 25 mm.	Clase 4
Hasta 265 mm; tolerancia en una probeta 25 mm.	Hasta 710 mm; tolerancia en una probeta 25 mm.	
Límites excedentes Clase 3		

2.8.2.4. Método de ensayo para la propagación superficial de la llama

La norma BS 476 Parte 7 determina la tendencia del material a permitir la expansión de una llama a lo largo de la superficie de una muestra de probeta con un área de 225 x 900 mm, con una longitud y espesor iguales a la del material compuesto bajo la consideración de que no exceda de 500 mm; se utilizan 6 probetas en este ensayo. Un panel radiante de 1 m² montado verticalmente y con una producción aproximada de 300 kW se coloca a aproximadamente 225 mm del borde corto de las muestras que a su vez están montadas verticalmente con sus ejes longitudinales horizontales. Los extremos más calientes de las probetas son entonces inflamados durante 1 minuto con una llama pequeña de aproximadamente 90 mm de longitud. Finalmente se mide la propagación de la llama en todas las probetas.

2.8.3. Resistencia al fuego: ensayos sobre estructuras

En la norma BS 476 Partes 3 y 8, la resistencia al fuego se aplica sólo a las estructuras y no a los materiales que constituyen estos elementos. Se mide generalmente en longitud de tiempo (p.e. 1/2 h, 1 h, etc...). Los ensayos de resistencia al fuego permiten la valoración de la capacidad que los elementos de construcción poseen para mantener su estabilidad estructural y resistir el contacto con una llama o con gases calientes.

2.8.3.1. Métodos de ensayo y criterios de resistencia al fuego de elementos de construcción

Los componentes de un ensayo deberían ser representativos del elemento de construcción en lo referente a fijaciones, acabados y fabricación, y el componente debería incluir al menos uno de cada tipo de unión. Antes del ensayo de calor, se somete a un componente de soporte de carga a unas tensiones de trabajo equivalentes para la estructura completa y se mantiene esta carga durante el tiempo de ensayo: el tiempo estándar es de 6 h a una temperatura de 1200 °C. Durante el ensayo se realizan las siguientes observaciones:

- **Estabilidad.** Se observa la deformación de la probeta y cualquier otro factor que pudiera afectar su estabilidad. En una construcción sin soporte de carga se asume que la rotura ocurre al aplastarse la probeta. Las estructuras con soporte de carga deberían soportar el ensayo de carga durante el período de calentamiento prescrito y por un mínimo de 24 h.
- **Integridad.** Se observa la presencia de grietas o cualquier otra abertura. Se supone que la rotura ocurrirá si la llama o los gases calientes pasan a través de estas aberturas y se determina sosteniendo, a intervalos frecuentes de no más de 10 segundos una plataforma de algodón o lana pegada a la apertura del componente, con el fin de observar si los gases calientes causan la ignición.

- Aislamiento. Las condiciones de temperatura de la cara no expuesta de la probeta se registran de forma continua.

Ensayo del tejado expuesto a fuego exterior. La norma BS 476 Parte 3 (1975) especifica que se deberían realizar 2 ensayos sucesivos: el ensayo de ignición preliminar y el ensayo de penetración del fuego y de ignición de la superficie. En el primero, la probeta se expone a una llama durante 1 minuto. Tras retirar la probeta de la llama, se realizan observaciones de cualquier resplandor continuo en la superficie superior o de penetración del fuego en el lado inferior. Si tiene lugar la penetración, no es necesario realizar más ensayos.

En el ensayo de penetración del fuego e ignición de la superficie, se ensayan tres probetas y se aplica un calor radiante de $14.6 \pm 0.5 \text{ kN/m}^2$ a la superficie superior de cada una durante 60 minutos, pudiendo prolongarse a 90 minutos si la penetración no ha ocurrido en este tiempo. Después de que la probeta ha sido expuesta al calor radiante durante 5 minutos, la llama se mueve lentamente sobre la superficie en intervalos durante un minuto. Se observa el tiempo y la incidencia de cualquier llama en las superficies superior e inferior y el desarrollo de los agujeros y fisuras. Se realiza una observación ocular de los cambios en la apariencia, llamas o goteo, y se mide la distancia mínima de la expansión lateral de la llama sobre la superficie superior. Los resultados están expresados mediante anotación con caracteres alfabéticos:

La letra X indica que:

- la duración de la llama es de más de 5 minutos una vez terminado el ensayo
- la distancia máxima de la llama en cualquier dirección es mayor de 370 mm. La letra P indica que:
- la duración de la llama es menor de 5 minutos
- la distancia máxima de la llama en cualquier dirección es menor de 370 mm.

La extensión de la ignición en la superficie se dará a los 60 minutos o al tiempo de penetración en los 25 mm más cercanos. La clasificación P60, así pues, indica que la probeta ha superado el ensayo preliminar y que la penetración del fuego no ocurre al cabo de 1 hora.

Tabla 2.3. Anotación para resultados de ensayo de penetración

Tiempo de penetración_____	Código
Mayor de 1 hora	A
Mayor de 1/2 hora	B
Menor de 1/2 hora	C
Fallos del ensayo previo_____	D

Aunque la clasificación anterior se ha introducido como norma British Standard, las notaciones de normas anteriores para clasificación se usan todavía .

Se usa un prefijo Ext F o Ext S para denotar el ensayo plano o inclinado, respectivamente, seguido de dos letras que denotan los resultados del ensayo de penetración y del ensayo de expansión de la llama. La letra final indica la extensión del goteo en la parte baja de la probeta. La aplicación del PRFV en estructuras de tejado debería, en general, ser al menos Ext SAA o Ext FAA.

Métodos de ensayos y criterios para medir la resistencia al fuego de elementos de construcción

La norma BS 476 Parte 8 (1972) establece los ensayos a realizar sobre elementos estructurales. La muestra tiene un tamaño de 3 m^2 , y forma una pared del horno; la temperatura se incrementa en el interior del horno; los termopares miden el incremento de la temperatura sobre la superficie del panel alejado del fuego. La rotura de la muestra está definida como un incremento de temperatura medio de 140°C con un termopar que da un aumento de temperatura mayor de 180°C . Así mismo, la rotura se definirá cuando los gases calientes o la llama penetren en la

muestra o cuando tenga lugar el aplastamiento del panel.

Estas dos condiciones definen el punto en el que tienen lugar la conductividad térmica a través del espesor y el aplastamiento del panel o del tejado.

2.8.4 Características de la generación de humo

Además de valorar las propiedades de la combustión y de la propagación de la llama de los materiales polímeros, es también necesario investigar las características de generación de humo; el humo y los gases desprendidos pueden ocasionar riesgos fisiológicos debido a la falta de visibilidad que ocasionan y al estado de pánico que se origina.

Los procesos experimentales para la valoración de la toxicidad e irritación debida al humo no se desarrollan correctamente y dependen principalmente de autoridades tales como el Ministerio de Defensa y las industrias aeronáuticas que producen sus propias especificaciones para el uso bajo un código de referencia particular.

Las industrias aeronáuticas han producido sus propias especificaciones técnicas que intentan establecer un procedimiento combinado de ensayo standard de riesgo del fuego. La Fire-Smoke-Toxicity Test Specification considera los aspectos de inflamabilidad, densidad del humo emitido y toxicidad de los gases de distintas partes de aviones y se intenta aplicar en la cámara de presurización del fuselaje de un avión comercial.

La norma Naval Engineering Standard (NES) detalla uno de una serie de métodos de ensayo para determinar las características combinadas de un material. El ensayo examina la producción potencial de humo de una muestra pequeña de material. El método está basado en la ASTM Special Technical Publication No. 422 (1967) 166-204, que ha sido invalidada por la ASTM E662: 1979 Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials. La norma NES 713 Issue 3 es el modelo para la determinación del índice de toxicidad de productos de combustión en términos de pequeñas partículas moleculares cuando una muestra pequeña de material se quema completamente en aire sobrante bajo condiciones específicas. El ensayo no determina necesariamente la toxicidad total de todos los constituyentes de los productos de combustión.

2.8.4.1 Densidad óptica del humo.

El método British Standard para la medida de la densidad óptica específica del humo generada por materiales está dado en la norma BS 6401 (1983). En este método, una probeta de forma especificada y un espesor de más de 25 mm se expone verticalmente a una fuente de calor radiante de 2.5 W/cm^2 en una vitrina cerrada, con o sin la aplicación de una llama auxiliar. El humo producido por un material varía de acuerdo al nivel de irradiación al que está expuesta la probeta y debería tenerse en cuenta que los resultados están basados en la exposición a un solo nivel de irradiación (i.e. 2.5 W/cm^2).

Cuanto mayor sea la cantidad de humo producida por una probeta, mayor será la densidad óptica y menor la visibilidad. Los datos limitados de los requerimientos de ejecución de los ensayos anteriores sugieren que bajo condiciones de combustión sin llama, los productos de base mineral con cantidades relativamente insignificantes de materiales combustibles tiene una densidad óptica baja, mientras que los materiales compuestos PRFV y las fibras revestidas de poliéster tiene una densidad óptica comparativamente alta.

2.8.5 Métodos de transmisión de retardancia de llama a PRF

Un revestimiento de resina intumescente retarda la combustión de los materiales orgánicos presentes en la estructura principal de los materiales compuestos PRFV y también reduce significativamente el área afectada por la llama, reduciendo el volumen de humo y eliminando prácticamente la combustión. Esta resina está específicamente formulada y preparada para ser aplicada mediante una brocha, después de la adición de un catalizador al laminado de PRFV. (También pueden usarse como revestimiento algunos materiales convencionales como lana y cuartón). Con un espesor recomendado de 0.4-0.5 mm (ó $450\text{-}600 \text{ g/m}^2$) se conseguirá una superficie limpia de polvo en 1 ha 18°C o mayor a más bajas temperaturas. Proporciona una protección ante el fuego por espumación en

situaciones donde los laminados PRFV está expuestos a una llama directa. Se aplicaría normalmente al reverso del panel de construcción PRFV para que la cara vista del sistema PRFV posea unas buenas propiedades frente a los agentes atmosféricos y la superficie interior garantizará propiedades ignífugas. La espuma carbonácea y los gases inertes que se producen al aplicar una llama a la superficie curada aíslan de la llama a la estructura principal del laminado PRFV durante un tiempo que dependerá de la severidad de las condiciones de calentamiento.

Los rellenos minerales tales como el carbonato calcico, el caolín, y el trihidrato de aluminio proporcionan al PRFV distintos grados de ignifugación. Estos rellenos reducen generalmente la cantidad de material combustible reemplazando alguna de las resinas en la masa de un laminado. En el caso del trihidrato de aluminio, el material de relleno tiene efectos adicionales ignífugos y de reducción del humo debido a la cantidad significativa de absorción del calor por la reacción endotérmica durante la descomposición de este material en aluminio y agua.

Para conseguir un nivel significativo de ignifugación, el contenido de material de relleno requiere más de 100 partes de relleno/100 partes de resina por peso. Para la producción de PRFV por el método de contacto, el contenido de material de relleno está limitado a un límite máximo de 75 partes por peso de la resina, y es generalmente de 45. Es por ello necesario añadir trióxido de antimonio y parafina clorada en el ratio de entre 2 y 15 y entre 1 y 10 partes por peso de resina, respectivamente, dependiendo de si se desea clase 2 o clase 1.

Para conseguir un nivel significativo de ignifugación, el contenido de material de relleno requiere más de 100 partes de relleno/100 partes de resina por peso. Para la producción de PRFV por el método de contacto, el contenido de material de relleno está limitado a un límite máximo de 75 partes por peso de la resina, y es generalmente de 45. Es por ello necesario añadir trióxido de antimonio y parafina clorada en el ratio de entre 2 y 15 y entre 1 y 10 partes por peso de resina, respectivamente, dependiendo de si se desea clase 2 o clase 1.

Scott Bader ha desarrollado una dispersión del trióxido de antimonio y un componente orgánico clorado, que es totalmente compatible con todas las resinas Crystic normales y es fácilmente dispersado por medios mecánicos simples. Sustituyendo un 20 % de una resina básica por Crystic Prefil F, se producen materiales compuestos con una superficie pequeña de dispersión de la llama. Para formulaciones de curado en frío se requiere al menos un 2% de acelerador E para asegurar que este curado sea satisfactorio.

Quedará claro tras la lectura de este capítulo que el grado de degradación de los polímero, cualquiera que sea el origen, depende principalmente del tipo de polímero utilizado y, por supuesto, de la calidad del proceso de curado. Es necesario que los ingenieros y arquitectos sigan los consejos de los fabricantes de resinas acerca de qué tipo de polímero deberá usarse para cada trabajo, y si fuera necesario, tener una formulación especial de resina para aplicaciones particulares.

2.9. Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de polímeros reforzados con vidrio son importantes cuando éstos se usan para componentes estructurales. Los polímeros no reforzados y no rellenos tienen un coeficiente de expansión muy alto que ocasiona problemas de diseño al usarse junto con materiales convencionales. La Tabla 2.4 contiene propiedades térmicas típicas de componentes PRFV y los compara con los materiales usados tradicionalmente en ingeniería. Un efecto de la incorporación de las fibras de vidrio y de los materiales de relleno en los materiales polímeros es la reducción del coeficiente de expansión térmica para un valor del mismo orden para el material compuesto que para el aluminio.

La conductividad térmica de todos los polímeros es baja; por tanto, los polímeros reforzados con vidrio de espesor suficiente son buenos aislantes y cuando se usan con fibra de vidrio, lana o polímeros con espuma, la construcción con materiales compuestos tiene un valor U extremadamente bajo. Cuando se usan polímeros como superficies de una construcción sandwich aislante, el material compuesto resultante posee una baja conductividad térmica. Quedará claro tras la lectura de este capítulo que el grado de degradación de los polímero, cualquiera que sea el origen, depende principalmente del tipo de polímero utilizado y, por supuesto, de la calidad del proceso de curado. Es necesario que los ingenieros y arquitectos sigan los consejos de los fabricantes de resinas acerca de qué tipo de polímero deberá usarse para cada trabajo, y si fuera necesario, tener una formulación especial de resina para aplicaciones particulares.

2.9. Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de polímeros reforzados con vidrio son importantes cuando éstos se usan para componentes estructurales. Los polímeros no reforzados y no rellenos tienen un coeficiente de expansión muy alto que ocasiona problemas de diseño al usarse junto con materiales convencionales. La Tabla 2.4 contiene propiedades térmicas típicas de componentes PRFV y los compara con los materiales usados tradicionalmente en ingeniería. Un efecto de la incorporación de las fibras de vidrio y de los materiales de relleno en los materiales polímeros es la reducción del coeficiente de expansión térmica para un valor del mismo orden para el material compuesto que para el aluminio.

La conductividad térmica de todos los polímeros es baja; por tanto, los polímeros reforzados con vidrio de espesor suficiente son buenos aislantes y cuando se usan con fibra de vidrio, lana o polímeros con espuma, la construcción con materiales compuestos tiene un valor U extremadamente bajo. Cuando se usan polímeros como superficies de una construcción sandwich aislante, el material compuesto resultante posee una baja conductividad térmica..

Para conseguir un nivel significativo de ignifugación, el contenido de material de relleno requiere más de 100 partes de relleno/100 partes de resina por peso. Para la producción de PRFV por el método de contacto, el contenido de material de relleno está limitado a un límite máximo de 75 partes por peso de la resina, y es generalmente de 45. Es por ello necesario añadir trióxido de antimonio y parafina clorada en el ratio de entre 2 y 15 y entre 1 y 10 partes por peso de resina, respectivamente, dependiendo de si se desea clase 2 o clase 1.

Scott Bader ha desarrollado una dispersión del trióxido de antimonio y un componente orgánico clorado, que es totalmente compatible con todas las resinas Crystic normales y es fácilmente dispersado por medios mecánicos simples. Sustituyendo un 20 % de una resina básica por Crystic Prefil F, se producen materiales compuestos con una superficie pequeña de dispersión de la llama. Para formulaciones de curado en frío se requiere al menos un 2% de acelerador E para asegurar que este curado sea satisfactorio.

Quedará claro tras la lectura de este capítulo que el grado de degradación de los polímeros, cualquiera que sea el origen, depende principalmente del tipo de polímero utilizado y, por supuesto, de la calidad del proceso de curado. Es necesario que los ingenieros y arquitectos sigan los consejos de los fabricantes de resinas acerca de qué tipo de polímero deberá usarse para cada trabajo, y si fuera necesario, tener una formulación especial de resina para aplicaciones particulares.

2.9. Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de polímeros reforzados con vidrio son importantes cuando éstos se usan para componentes estructurales. Los polímeros no reforzados y no rellenos tienen un coeficiente de expansión muy alto que ocasiona problemas de diseño al usarse junto con materiales convencionales. La Tabla 2.4 contiene propiedades térmicas típicas de componentes PRFV y los compara con los materiales usados tradicionalmente en ingeniería. Un efecto de la incorporación de las fibras de vidrio y de los materiales de relleno en los materiales polímeros es la reducción del coeficiente de expansión térmica para un valor del mismo orden para el material compuesto que para el aluminio.

La conductividad térmica de todos los polímeros es baja; por tanto, los polímeros reforzados con vidrio de espesor suficiente son buenos aislantes y cuando se usan con fibra de vidrio, lana o polímeros con espuma, la construcción con materiales compuestos tiene un valor U extremadamente bajo. Cuando se usan polímeros como superficies de una construcción sandwich aislante, el material compuesto resultante posee una baja conductividad térmica.

Tabla 2.4. Propiedades térmicas de varios materiales ingenieriles

El límite de temperatura al cual las resinas comienzan a perder su rigidez es conocido como temperatura de deflexión (HDT). Si la resina está reforzada el valor sube cerca de 20°C. La temperatura de deflexión representa un factor límite en el diseño dada la tendencia al agrietamiento del material bajo carga cuando se aproxima a esta temperatura. BS 4994 [3] no permite el uso de resinas a temperatura mayor de (HDT-20)°C.

British Standard Specifications 8208 (no hay norma ISO equivalente) valora la conveniencia de las paredes huecas. Los factores que afectan el entorno ambiental interno de un edificio junto a las recomendaciones para un diseño apropiado y el aislamiento térmico de edificios están controlados por regulaciones de construcción.

Material	Coefficiente de expansión lineal ($^{\circ}\text{C} \times 10^{-6}$)	Conductividad térmica ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
Acero	11.3	46.0
Aluminio	23.0	140.0-190.0
Madera	5.4-54	0.124-0.24
Hormigón	13.0	0.98
Fibra de vidrio	8.6	1.02
Resina de poliéster	50-100.0	0.11-0.28
Unidireccional de vidrio con poliéster	9.0-11.0	0.3-0.35
Tejido de vidrio con poliéster	11.0-16.0	0.2-0.3
Mat moldeado por contacto	22.0-36.0	0.2-0.24
SMC	20.0-28.0	

2.10. Propiedades de resistencia química

La resistencia química de laminados PRFV depende de la composición del material compuesto, el tipo de polímero, el acabado de la superficie y el grado de curado. Además, la resistencia al agua y al clima de los materiales compuestos polímeros es función de la calidad del gel-coat, que es la superficie expuesta a la atmósfera.

Generalmente, bajo condiciones ambientales normales, el ataque ácido y alcalino sobre el material compuesto no preocupará al ingeniero de estructuras; el requerimiento principal es que las resinas de poliéster y epoxi deben ser curadas de manera apropiada. Si, no obstante, se encuentran condiciones ácidas y alcalinas, éstas agravarán los efectos de la humedad sobre el material polímero.

Los PRFV se usan para la fabricación de plantas de proceso, como tanques de almacenaje, depósitos de reacción, bombas y tuberías, y en estos casos los procedimientos de diseño deben ser seguidos cuidadosamente. Actualmente se usan algunos métodos para seleccionar la tensión de diseño, el más común es aquel basado en la división de la resistencia a tracción última por el factor de diseño, generalmente en el rango 8-16. También puede obtenerse la tensión de diseño a partir de rotura de tensión a largo plazo o datos de fatiga. La tensión de diseño obtenida de este modo puede ser reducida mediante la aplicación de factores arbitrarios a tener en cuenta: variables de fabricación, y otras consideraciones tales como el ambiente químico.

La selección del PRFV para aplicaciones químicas se ha apoyado tradicionalmente en los resultados de exponer laminados no sometidos a tensión a condiciones ambientales por períodos superiores a 1 año. Estos ensayos satisfacen los requerimientos DIN o ASTM, o en el caso de condiciones ambientales severas como ácido sulfúrico e hidróclórico, han sido objeto de análisis detallados para determinar los efectos de la temperatura, la concentración y permeabilidad. La respuesta del material viene dada por sus propiedades mecánicas residuales (dureza, resistencia a flexión y rigidez) y por la observación visual de cualquier ampolla o delaminación. Sin embargo, mientras que los datos de retención de resistencia nos informan acerca de los mecanismos del ataque químico y por tanto nos permiten tomar decisiones de la conveniencia del PRFV para un medio ambiente particular, la información así obtenida tiene un valor limitado para fines de diseño.

Las variables a tener en cuenta en los ensayos de los PRFV en condiciones ambientales son:

- tipo de resina
- tipo de fibra

- espesor del gel-coat y refuerzo
- sistema catalizador y programa de curado
- proporción fibra/matriz
- aditivos (reellenos, ceras retardantes al fuego, etc.)
- efectos de inhibición del aire
- tipos de exposición
- espesor del material compuesto

Los tipos de resina más usados y que proporcionan distintos grados de resistencia química son:

- ortoftálica - baja resistencia química
- isoftálica, tereftálica - resistencia química media
- bifenol, ácido caliente, viniléster, furánica y epoxi - alta resistencia química



Figura 2.4. Construcción exterior realizada en materiales compuestos de fibra de vidrio y resina de poliéster donde los efectos de radiación ultravioleta del sol y el tiempo atmosférico son de gran importancia.

2.10.1. Efectos de agentes químicos sobre los polímeros

El agua se esparce muy lentamente dentro de los polímeros reforzados con fibra y alcanza el equilibrio después de un año. A temperatura ambiente, se incrementa el porcentaje en peso debido a que la absorción del agua es del 0.3%, mientras que a 80°C el porcentaje equivalente es 1.0. Hay una reducción en resistencia conforme el agua se esparce por los polímeros y después de un año los laminados de poliéster bisfenol tendrán un valor de retención de resistencia de sólo un 60%. Los laminados de poliéster isoftálico sufren una gran disminución de resistencia conforme el agua se esparce y después de 9 meses el valor de retención de resistencia es sólo del 20%. Los laminados de poliéster ortoftálico tienen una muy pobre retención de resistencia de sólo un 20% después de 1 mes.

Si existe una afinidad química fuerte entre la resina de laminación y los agentes químicos atacantes, las moléculas pequeñas (solventes) pueden esparcirse por la totalidad del polímero y afectar a las propiedades mecánicas. Generalmente, la absorción física causa:

- pérdida de resistencia y rigidez
- incremento en dureza y grado de deformación del polímero.

De este modo las moléculas invasoras destruyen algunas de las uniones químicas en la resina y las propiedades mecánicas se degradan.

Si el ataque químico es ácido, como en el caso de las tuberías de elementos químicos de desecho, es posible incorporar un revestimiento termoplástico; estos han sido incorporados con éxito a piezas de PRFV. Los revestimientos incluyen:

- PVC
- polipropileno
- PVDF
- PTFE
- polietileno

Sin embargo, el uso del sistema de aislamiento es limitado en ambientes orgánicos debido a la difusión de agentes orgánicos en el revestimiento y el consiguiente ataque en el laminado reforzante.

2.10.2. Condiciones climáticas

Los polímeros que están expuestos a condiciones climáticas naturales sufrirán un deterioro que dependerá de factores como:

- Tipo de resina usada para el gel-coat y para la laminación del material compuesto
- Orientación del material compuesto respecto a los rayos del sol
- Componente ultravioleta de la luz solar sobre el material compuesto
- Acción del tiempo atmosférico sobre el material compuesto en diferentes climas y situaciones
- Proporción de "impurezas" en el polímero (p.e. aditivos retardantes del fuego, etc.)
- Las precauciones en el nivel de control de calidad requerido para asegurar un ambiente de producción conveniente, un proceso de fabricación correcto y un curado adecuado de la resina.

2.10.2.1. Gel-coat

La durabilidad de los materiales compuestos polímeros depende principalmente de la calidad de su superficie en exposición. En consecuencia, es necesario proteger esta superficie, y en particular cualquier fibra expuesta que pueda ser atacada por la humedad atmosférica mediante gel-coat. Este recubrimiento es la parte más importante de un laminado y por tanto se debe tener gran cuidado durante la formulación de la resina y su aplicación al material compuesto por medio de brocha o por proyección hasta conseguir un espesor uniforme de 0.4 - 0.5 mm. Si la capa de gel-coat es demasiado fina puede no curarse totalmente y la fibra de vidrio podría quedar al descubierto. Por el contrario, si es demasiado gruesa, puede agrietarse o romperse, con la consecuente reducción de la resistencia a impacto. Una variación en el espesor de la capa de gel-coat provocaría diferentes grados de curado y sería prudente reforzarla con una fina capa de tejido de fibra de vidrio.

2.10.2.2. Orientación del material compuesto respecto a los rayos del sol

Tiene un efecto significativo en su grado de deterioro. Por ejemplo, un panel de material compuesto PRFV orientado hacia la dirección del sol sufrirá un desgaste mayor (por los rayos ultravioletas) que un panel que esté protegido. Por el contrario, el panel protegido ante los rayos del sol tardará más en secarse y por tanto se desgastará en este sentido más que el panel que esté en dirección al sol.

2.10.2.3. Componente ultravioleta del sol



Figura 2.5. Láminas translúcidas de placa ondulada de poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Degrada al material compuesto y la banda de longitud de onda corta a 330 nm produce el mayor efecto en los poliésteres. Se manifiesta por una decoloración del polímero y un deterioro en la superficie del material compuesto. Para evitar este problema se incorporan estabilizadores de radiación ultravioleta en formulaciones de resina de poliéster. La inclusión de estos estabilizadores en formulaciones de resina epoxi parece tener poco efecto en lo que se refiere a la decoloración y no existe evidencia de que una exposición continua a los rayos solares afecte a las propiedades mecánicas de estos polímeros.

2.10.2.4. Acción del tiempo atmosférico sobre los materiales compuestos

La norma BS 4618 (no existe norma ISO equivalente) recomienda hacer ensayos bajo condiciones atmosféricas naturales por un tiempo de 3 meses, 6 meses, 1, 2, 4, 6, 8 y 10 años, o por períodos tan largos como sea necesario. Los climas están clasificados en un sentido amplio en cinco tipos diferentes:

- cálido y seco
- mesotérmico
- templado
- frío

Se recomienda que las condiciones de ensayo simulen aquellas de servicio normal; además, deberían realizarse otras pruebas. Por ejemplo, los efectos de una limpieza periódica debería observarse en una segunda serie de probetas.

Durante los ensayos a la intemperie, las probetas a examen se valoran comparándolas con aquellas almacenadas bajo unas condiciones determinadas, observándose:

- dimensiones
- apariencia visual
- propiedades mecánicas
- ataque biológico

2.10.2.5. Elementos de relleno

Los elementos de relleno y los pigmentadores tienen un gran efecto sobre la apariencia y durabilidad de los polímeros. Los polímeros pigmentados absorben incidentalmente rayos infrarrojos y radiación visible y este proceso tiende a acelerar el grado de degradación aumentando la temperatura del material compuesto; es particularmente notable en climas cálidos; las resmas epoxi también tienden a degradarse de igual manera en climas cálidos.

La mayoría de las estimaciones a largo plazo acerca de la calidad y comportamiento de materiales compuestos polímeros se derivan de acelerar los ensayos pero inevitablemente esto tiene unas limitaciones debidas principalmente a:

- la dificultad de correlacionar los resultados de ensayos de laboratorio acelerados con condiciones atmosféricas normales;
- falta de inter-relación de materiales polímeros

2.11. Insonorización

En todos los edificios se debe reducir al mínimo la transmisión del sonido. La forma idónea de conseguir esto es incorporar a la construcción materiales voluminosos pesados. Como ocurre con muchos otros materiales, normalmente no se utilizan grandes volúmenes de polímeros reforzados y en consecuencia la reducción de sonido es difícil de conseguir. El grado de insonorización requerida puede lograrse utilizando un diseño de material compuesto. En una construcción sandwich esto puede conseguirse mediante un núcleo relleno de espuma o usando una lámina de yeso como material de revestimiento en el que el sonido sea reflejado o absorbido.

El poliestireno expandido se usa en ocasiones en la fabricación de tejas pero no absorbe el sonido debido a su porosidad como lo hacen la mayoría de tejas acústicas. Pueden, no obstante, dar una medida de absorción cuando se montan en listones dejando una bolsa de aire entre las tejas y la superficie de soporte.

British Standard Specification 8233 [6] y British Standard Code of Practice 153, Parte 3, dan las pautas del diseño de elementos de construcción y componentes para asegurar una insonorización adecuada y una reducción de ruido para varios tipos de edificios y localizaciones.

2.12. Propiedad de transmisión de la luz

La transmisión de la luz en un material compuesto de PRFV translúcido expuesto a la atmósfera un número de años depende del tipo de resina usada y del contenido de resina. Scott Bader ha observado una reducción del 14% en cinco años de transmisión de la luz en la resina Crystic 191 E reforzada con mat de vidrio con un ratio fibra/matriz de 30/70% en peso y con un gel-coat conteniendo un fino tejido de superficie. El mismo material compuesto sin gel-coat tiene una reducción del 30% y la resina con mat de vidrio con un ratio fibra/matriz de 35/65% por peso, tiene un reducción de aproximadamente 70%; estos ejemplos están tomados sobre un período de tiempo igual.

La acumulación de suciedad en la superficie interna de laminados de PRFV usados como placas de tejado es causa de reducción en la transmisión de la luz y es aconsejable la limpieza periódica de estas superficies. Los problemas más comunes en los laminados con resina ignífuga son la decoloración, variaciones en el matiz, y la aparición de partículas de suciedad sobre la superficie de laminados translúcidos.

2.13. Resistencia a la abrasión

Depende de la dureza y resistencia del material compuesto. Las resinas de poliéster y epoxi son polímeros duros y asociados con la fibra de vidrio tiene un efecto sobre las propiedades físicas del material compuesto. Sin embargo, para obtener una mejora en la resistencia a la abrasión de los materiales compuestos, es esencial utilizar un gel-coat con tejidos finos de superficie. La Tabla 2.5 nos da los valores de resistencia a la abrasión típicos para gel-coats "buenos" y "malos".

000000000000

Tabla 2.5. Típica resistencia de abrasión de laminados PRFV

Material	Rugosidad de la superficie (µm)		Desgaste (µm)
	Inicial	Después de 1200 ciclos con un abrasivo	
Buen gelcoat	0.25-0.76	1.0	64
Mal gel coat	0.25-0.76	5.3	192

2.14. Durabilidad

Con el término *durabilidad* se designa el periodo de tiempo en el que un material desarrollará la tarea a él asignada en un medio ambiente dado. La especificación de durabilidad debería permitir a los componentes cumplir las especificaciones de la vida esperada del edificio; sin embargo, para algunos componentes, una vida más corta sería aceptable. Para que esto sea realista, la especificación necesitará incorporar concesiones para cualquier cambio anticipado.

La durabilidad es a menudo difícil de valorar y requiere un juicio justo de aquello que constituye una duración suficiente y una ejecución adecuada. Una duración de un año puede ser adecuada si consideramos un ambiente químico, y Yovino y Dunwoody han comparado la resistencia del PRFV y de otro material ante fluidos agresivos durante este periodo de acuerdo a la ejecución. Por otra parte, la vida útil de un material compuesto que forma parte de un edificio expuesto a la intemperie puede ser de 50 años. Esto plantea un problema a la hora de intentar mejorar las formulaciones, ya que los resultados sobre el terreno sobre periodos limitados deben ser extrapolados a una longitud de tiempo específica.

Desde el punto de vista de la durabilidad es difícil de conseguir un rendimiento adecuado ya que las propiedades estéticas, difíciles de cuantificar, pueden ser importantes. Una condición no aceptable para la iluminación procedente del tejado debe definirse con precisión en términos de transmisión de la luz. En el caso de recubrimiento, una decoloración desigual y una acumulación de suciedad pueden manifestar cambios que son inaceptables pero difíciles de definir.

La apariencia de las superficies en exposición de un material compuesto polímero puede cambiar bajo condiciones atmosféricas naturales y en algunos casos puede ser suficiente para convertir este material en estéticamente inaceptable. Las propiedades mecánicas de los polímeros pueden también decaer por su exposición a la intemperie, en especial la resistencia a tracción y la resistencia a impacto que son sensibles al deterioro superficial.

Crowder ha establecido que los cambios en la apariencia óptica, mecánica y superficial no están interrelacionados. En consecuencia, las observaciones de una propiedad simple no son una medida adecuada para determinar el rendimiento a la intemperie de un material polímero. Los fenómenos que llevan a la rotura de polímeros debidos a la exposición a la intemperie son complejos y varían según materiales.

Muchos de los problemas relacionados con la apariencia y rendimiento de materiales compuestos polímeros están originados por una causa tan básica como el curado insuficiente del polímero. Sin embargo, podemos encontrar defectos visibles y otros que no lo son en el material compuesto y que se hacen evidentes en algún momento de la vida de la estructura; seguidamente se exponen algunos de estos defectos y como evitarlos.

- Adhesión defectuosa del gel-coat a la resina de laminación: Este defecto puede observarse durante la manipulación del material compuesto cuando las piezas del gel-coat se desprenden de la resina de laminación o cuando existen ampolla u ondulaciones en la superficie del material. La causa de la adhesión defectuosa del gel-coat es generalmente la consolidación inadecuada del laminado o el sobrecurado del gel-coat antes de comenzar la laminación.
- Arrugamiento del material compuesto: Si el gel-coat no ha sido suficientemente curado, puede ser atacado por un monómero en la resina de laminación con el resultado de arrugamiento. Para evitar este problema, se debe usar una formulación correcta de la resina, la capa de gel-coat no debe ser muy fina y la temperatura y la humedad se deben controlar durante el proceso de fabricación.
- Dibujo de la fibra: El dibujo de la fibra es a veces visible a través del gel-coat o perceptible sobre la superficie del material compuesto. Este defecto ocurre si la capa de gel-coat es demasiado fina o la resina de laminación y la fibra han sido apiladas o enrolladas antes de que el gel-coat se haya endurecido suficientemente.
- Burbujas en el material compuesto: Las burbujas que se forman cuando el aire o los disolventes quedan atrapados en el laminado, pueden extenderse por gran parte del material compuesto y comienzan a observarse cuando comienza la delaminación del material, lo que puede ocurrir meses después de la fabricación. Las burbujas se forman normalmente porque la resina de laminación no ha sido suficientemente curada o porque la pieza moldeada ha sido expuesta a una excesiva radiación de calor durante el curado. Una posible causa de la extensión de las burbujas a lo largo del espesor del laminado es la humedad insuficiente del refuerzo. Si el laminado ha entrado en contacto con el agua durante un período largo de tiempo, las burbujas pueden formarse

debido al desplazamiento del aire entre los huecos del material compuesto; estos huecos pueden estar tanto dentro como debajo del gel-coat. La presión en los huecos se incrementa con inmersiones prolongadas en agua hasta que el gel-coat rompe y la presión se libera. Este efecto es más severo en agua dulce o en agua previamente calentada. Para evitar este problema, se debería usar un sistema de resina compatible y emplearse una técnica de fabricación correcta para obtener un laminado compacto sin huecos.

- Cuarteado en la superficie del material compuesto: El cuarteado aparece en forma de finas fisuras en la superficie de la resina. Puede producirse inmediatamente después de la fabricación o durante su vida útil. El problema está asociado a zonas ricas en resina y su causa es la incorrecta formulación de la resina para el gel-coat. Si el cuarteado se produce después de una exposición prolongada a la luz del sol o al ataque químico, podría ser el resultado de un curado insuficiente o de demasiado relleno en el gel-coat.
- Humedad insuficiente del mat: La humedad insuficiente del mat puede producirse debido a que el ratio fibra/matriz es demasiado alto para el proceso de fabricación usado. Este defecto ocurre normalmente en la parte más alejada del gel-coat.
- Filtración del polímero: La filtración está caracterizada por una pérdida de resina del laminado provocando así la exposición de la fibra de vidrio al ataque de la humedad de la atmósfera. Este problema indica que ha habido bien un curado inadecuado del material compuesto, o que existe una incompatibilidad entre la resina y el uso en activo.
- Amarilleo del polímero: Los laminados PRFV tienden a amarillear tras una exposición a la luz solar. Generalmente es muy suave pero puede ser severo en el caso de laminados con pigmentación blanca. Es el resultado de la absorción por la resina de la radiación ultravioleta, aunque añadiendo estabilizadores de ultravioletas a la formulación de la resina, se puede reducir considerablemente. Las resinas epoxi absorben totalmente la gama ultravioleta y la exposición a la luz solar produce amarilleo y degradación de la superficie, aunque no hay evidencia de que esto afecte seriamente a las resistencias o módulos de tracción y flexión. Los estabilizadores de ultravioletas y absorbentes conducen a una pequeña mejora en el sistema de resina epoxi.

2.15. Reparación de materiales compuestos

Se requieren dos tipos de reparación de materiales compuestos como resultado de los defectos que se producen durante la operación de moldeo o durante la vida en servicio de los materiales compuestos.

2.15.1. Tipos de reparación

El primer tipo de reparación, emprendido en las fases de ajuste y acabado del laminado en fábrica, no presentará normalmente dificultades debido a la calidad del material y a los conocimientos técnicos de los fabricantes. Se elimina la resina y el refuerzo sobrantes, quedando así la superficie rugosa, limpia y seca. Se apilan nuevas capas de resina y refuerzo, de modo que la última solape el refuerzo anterior, permitiendo así una buena adhesión y pegado.

Si el laminado se rompe, se corta el área completa y en los bordes se avellana de modo que el área del agujero sea mayor en la capa exterior de gel-coat, y esta capa avellanada queda rugosa. Si el área afectada es grande, se debe hacer un molde temporal antes de aplicar el agente de liberación, el gel-coat y la resina de laminación.

El segundo tipo de reparación se refiere a materiales compuestos polímeros que se han dañado en servicio. Se debe considerar los siguientes aspectos:

- La tolerancia al daño del material y su aplicación.
- Las técnicas de ensayo no destructivo que pueden usarse para identificar el tipo y extensión del daño en un componente.

El primer punto depende de la aplicación del material compuesto. En situaciones donde el diseño toma en cuenta los agujeros para fijaciones y cierres, por ejemplo, las tensiones de diseño son generalmente bajas y consecuentemente, el grado tolerado puede ser determinado mediante inspección ocular. La técnica de ensayo no destructivo que puede usarse para definir el área a reparar es la técnica de ultrasonidos. Pero para valorar las componentes tensionales más elevadas se debe usar una técnica de ensayo no destructivo más sofisticada, de modo que el daño crítico esté por debajo del umbral visible sobre la superficie de impacto.

Para definir el nivel de daño en un laminado delgado, se golpea la superficie de éste con un pequeño martillo para estimar el área de delaminación. Para un laminado grueso se debe usar la técnica de ultrasonidos. Aunque la interpretación de los resultados a partir de ambos métodos requiera una experiencia técnica considerable, probablemente sean las técnicas de ensayo no destructivos más usadas.

Otros métodos para la detección del daño son la termografía por rayos infrarrojos, la tomografía por rayos X y la vibro termografía por ordenador, aunque estos métodos son difíciles y caros para este campo. Las fibras ópticas embebidas en la estructura y la emisión acústica han sido también usadas con éxito para detectar daños en estructuras de materiales compuestos. Además han sido desarrolladas pinturas "pulverizables" dispersas en pinturas tradicionales y con una base de micro-esferas que contienen un colorante. Cuando ocurre el impacto, las esferas estallan, desprendiendo el colorante e indicando así el área de impacto.

Si los materiales compuestos poliméricos se han dañado en servicio, es fácil que se contaminen por las radiaciones ambientales, o si se usan en maquinaria, piezas de automóvil, o fuselaje de avión, pueden ser contaminados por una película de fluido hidráulico o grasa que sería muy difícil, si no imposible, de eliminar. Así mismo, el material se degradará por su exposición al medio ambiente; particularmente si el material compuesto es usado en la construcción y expuesto a agentes atmosféricos naturales. Por esto, la reparación nunca es tan fiable como la sustitución de la pieza, teniendo además en cuenta que ésta se debe realizar in situ.

2.15.2. Reparación mediante uniones por adhesivo

El tipo más común de reparación de materiales compuestos es la técnica de unión por adhesivo, pero el sistema a usar dependerá del material y del método de fabricación del material compuesto original. Por ejemplo, la reparación de laminados realizados por el método de contacto es más sencilla de realizar que aquella de laminados curados en caliente a alta presión.

Los laminados "patches" son probablemente inestables dimensionalmente con respecto al material compuesto polímero original. En primer lugar, la resina en el material compuesto último tendrá un curado posterior y sufre un acortamiento en servicio. En segundo lugar, el "uptake" de agua estará probablemente en o cerca de la saturación, y en consecuencia la resina sufrirá un aumento en volumen. Para permitir una reparación de un material compuesto polímero dañado, es necesario que las tensiones de los materiales reparados y las de los que no han sufrido daño estén lo más igualadas posible.

En general un daño pequeño puede repararse por medio de una pasta adhesiva aplicada en el área afectada. Si hay delaminación y está localizada, se puede reparar inyectando resina con una jeringuilla en el área defectuosa. Los daños grandes necesitan que se reemplace la zona afectada con un parche unido al material bien mediante adhesivo o por tornillos. En ambos casos, la reparación se efectúa usando un parche de material isótropo o cuasi-isótropo.

2.15.3. Reparación mediante uniones atornilladas

El problema principal en las reparaciones mediante uniones atornilladas en estructuras de materiales compuestos es la dificultad en la inspección y en la valoración del parche, en particular, de la calidad del revestimiento; en consecuencia, el control de calidad del proceso debe ser muy estricto. En muchos ejemplos, donde no se dispone de la destreza y las condiciones para conseguir una reparación de confianza mediante uniones adhesivas, se prefiere la reparación mediante uniones atornilladas. En la reparación por uniones atornilladas se debería obtener el 80% de la resistencia del material original, siendo adecuada para la mayoría de las aplicaciones en el campo de la ingeniería civil.