

Propiedades y aplicaciones de los polímeros sintéticos en la construcción

Autor: Héctor Sarrión Sos

Tutor: José Vercher Sanchís

Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Curso 2017 - 2018



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

Quisiera agradecer a mi tutor José Vercher por la ayuda y la confianza depositada en mí, a mis compañeros de universidad que me han acompañado estos años de carrera y a mi familia, mis padres y mi hermana, por apoyarme en todas las decisiones que tomo.

Índice

Resumen

Objetivos y motivación

1. Introducción.....	1
1.1 Breve historia de la evolución de los materiales de construcción.....	3
1.2 Polímeros sintéticos.....	5
1.3 Fibras.....	6
2. Fibra de carbono.....	7
2.1 Definición.....	9
2.2 Historia.....	9
2.3 Estructura.....	10
2.4 Síntesis/Fabricación.....	10
2.5 Propiedades.....	13
2.6 Coste.....	13
2.7 Clases de fibra de carbono.....	14
2.8 Aplicaciones en la construcción.....	15
2.8.1 Arquitectura modular – Construcción industrializada.....	15
2.8.2 Refuerzos constructivos y anti-sísmicos.....	17
2.8.3 Sustitución de acero por carbono.....	20
2.8.4 Decoración /Mobiliario.....	22
2.9 Ejemplos de construcciones con fibra de carbono.....	23
2.9.1 Edificio de Seiren Fabric Laboratory.....	23
2.9.2 ICD + ITKE Pavilion.....	26
2.9.3 Puente Arkitektbron.....	27
3. Fibra de aramida.....	29
3.1 Definición.....	31
3.2 Historia.....	31
3.3 Estructura.....	32
3.4 Síntesis/Fabricación.....	33
3.5 Propiedades.....	35
3.6 Coste.....	36
3.7 Clases de fibra de aramida.....	37

3.8 Aplicaciones en la construcción.....	38
3.8.1 Hormigón reforzado con fibra de aramida.....	38
3.8.1.1 Historia.....	38
3.8.1.2 Análisis.....	39
3.8.1.3 Ventajas e inconvenientes del hormigón reforzado con fibras.....	40
3.8.1.4 Conclusiones.....	40
3.8.2 Protección contra el calor y el fuego.....	41
3.8.3 Formación de barras de aramida.....	41
3.8.4 Refuerzos constructivos.....	42
3.8.5 Nido de abeja de aramida Nomex.....	42
3.9 Ejemplos de construcciones con fibra de aramida.....	43
3.9.1 Estadio olímpico de Montreal.....	43
3.9.2 Transformación de la Torre Eiffel.....	46
3.9.3 Disaster-Resistant House.....	48
4. Fibra de vidrio.....	49
4.1 Definición.....	51
4.2 Historia.....	51
4.3 Estructura.....	52
4.4 Síntesis/Fabricación.....	52
4.5 Propiedades.....	55
4.6 Coste.....	55
4.7 Clases de fibra de vidrio.....	56
4.8 Aplicaciones en la construcción.....	60
4.8.1 Paneles GRC.....	60
4.8.1.1 Composición.....	60
4.8.1.2 Fabricación.....	61
4.8.1.3 Características/Ventajas.....	62
4.8.1.4 Aplicaciones y acabados.....	64
4.8.1.5 Formatos.....	65
4.8.2 Lana de vidrio.....	67
4.8.3 Recubrimientos.....	68
4.8.3.1 De muros y pilares.....	68

4.8.3.2 De fachadas.....	69
4.8.3.3 De vigas, barandillas y celosías.....	69
4.9 Ejemplos de construcciones con fibra de vidrio.....	70
4.9.1 Módulo 10x10.....	70
4.9.2 Rascacielos de REX Architecture.....	71
4.9.3 Serpentine Gallery 2014.....	72
5. Análisis comparativo entre materiales.....	73
5.1 Comparativa de fibras de carbono, aramida y vidrio.....	75
6. Conclusiones.....	79
7. Referencias bibliográficas.....	83
7.1 Bibliografía documental.....	85
7.2 Bibliografía gráfica.....	88

Resumen

A lo largo de los años, desde la civilización egipcia pasando por la arquitectura moderna, el uso de materiales ha ido cambiando, transformando la arquitectura y dando lugar a conceptos estructurales y estéticos diversos.

En el siglo XX con la llegada de la nueva corriente moderna cambia la concepción en la utilización de materiales como el hormigón o el acero. Esta tendencia se ve incrementada más aún a finales de siglo con la llegada de nuevas tecnologías que permiten un uso diverso de los mismos, además de aumentar la investigación y desarrollo de nuevos materiales capaces de alcanzar elevados niveles de confort o una estética novedosa. Todo esto siendo accesibles para el cliente y tratando de reducir el impacto en el medio ambiente.

El objetivo de este TFG es investigar sobre las propiedades y aplicaciones de fibras sintéticas como el kevlar, la fibra de carbono o la fibra de vidrio. Para ello se llevará a cabo la elaboración de un análisis previo de la evolución histórica de los materiales, para a continuación realizar un estudio sobre los propuestos, su origen, características, propiedades, técnicas constructivas y usos actuales, además de un análisis comparativo, en virtud de posibles mejoras en la calidad de la edificación.

Palabras clave

Nuevos materiales, fibras sintéticas, kevlar, fibra de carbono, fibra de vidrio, tecnología, medio ambiente, construcción.

Summary

Over the years, from Egyptian civilization to modern architecture, the usage of materials has been changing, transforming architecture and giving rise to diverse structural and aesthetic concepts.

In the 20th century, with the arrival of the new modern trend, the concept of using materials such as concrete or steel changed. This trend is further increased at the end of the century with the arrival of new technologies which allowed a diverse use of them, in addition to increasing research and development of new materials capable of achieving high levels of comfort or a new aesthetic. All this being accessible to the customer and trying to reduce the impact on the environment.

The objective of this TFG is to investigate the properties and applications of synthetic fibers such as kevlar, carbon fiber or fiberglass. For this purpose, a preliminary analysis of the historical evolution of the materials will be carried out, followed by a study of the proposed ones, their origin, characteristics, properties, construction techniques and current uses, as well as a comparative analysis, in virtue of possible improvements in the quality of the edification.

Keywords

New materials, synthetic fibers, kevlar, carbon fiber, fiberglass, technology, environment, construction.

Resum

Al llarg dels anys, des de la civilització egípcia passant per l'arquitectura moderna, l'ús de materials ha anat canviant, transformant l'arquitectura i donant lloc a conceptes estructurals i estètics diversos.

Al segle XX amb l'arribada del nou corrent modern canvia la concepció en la utilització de materials com el formigó o l'acer. Aquesta tendència es veu incrementada més encara a finals de segle amb l'arribada de noves tecnologies que permeten un ús divers dels mateixos, a més d'augmentar la investigació i desenvolupament de nous materials capaços d'aconseguir elevats nivells de confort o una estètica innovadora. Tot açò sent accessible per al client i tractant de reduir l'impacte en el medi ambient.

L'objectiu d'aquest TFG és investigar sobre les propietats i aplicacions de fibres sintètiques com el kevlar, la fibra de carboni o la fibra de vidre. Per a això es durà a terme l'elaboració d'un anàlisi prèvi de l'evolució històrica dels materials, per a continuació realitzar un estudi sobre els proposats, el seu origen, característiques, propietats, tècniques constructives i usos actuals, a més d'una anàlisi comparatiu, en virtut de possibles millores en la qualitat de l'edificació.

Paraules clau

Nous materials, fibres sintètiques, kevlar, fibra de carboni, fibra de vidre, tecnologia, medi ambient, construcció.

Objetivos

En este trabajo se estudiarán los polímeros sintéticos más utilizados en la construcción, entre los que se encuentran la fibra de carbono, la fibra de aramida y la fibra de vidrio. Estos materiales están aportando aplicaciones en la arquitectura fruto de investigaciones previas para otros campos.

Los objetivos se basan en un entendimiento básico del origen y propiedades de estos materiales, seguido de un conocimiento sobre aplicaciones actuales en la construcción, para acabar con ejemplos arquitectónicos ya construidos usando las ventajas y características de estos polímeros.

En el entendimiento básico se concretará la historia del origen del material, su estructura básica, los procesos de síntesis y fabricación, además de sus propiedades, coste y clases existentes de estos materiales en la actualidad.

A continuación, se concretará el origen, estructura, propiedades y aplicaciones de estos polímeros en la construcción, desde elementos decorativos hasta estructurales.

Más tarde, se analizarán proyectos de diferentes tipos donde los usos de los polímeros sintéticos sean relevantes para su funcionamiento o estética.

Por último, dada la importancia no solo constructiva sino innovadora de estos materiales emergentes, se planteará también una breve comparación entre ellos y los materiales tradicionales de uso actual.

Motivación

Desde niño, el mundo del motor siempre ha estado ligado a mí. Me ha interesado todo lo relacionado con las marcas, los modelos, los neumáticos y un sinfín de temas con cualquier cosa que tuviera que ver con las cuatro ruedas. Pero sobre todo, en lo que más énfasis he puesto ha sido en el mundo de la tecnología en la competición. Y más concretamente en los materiales usados para conseguir seguridad sin sacrificar velocidad.

Es por esto que materiales como la fibra de carbono, la fibra de vidrio o el kevlar han estado pasando por mi cabeza durante años. Desde que en 1980 se aplicaran estas fibras sintéticas en los coches de Fórmula 1 prácticamente todo el cuerpo de un coche de competición se hace de materiales de alta resistencia y bajo peso. Desde el chasis hasta el casco pasando por los alerones y piezas del motor, las fibras sintéticas están presentes en la mayoría de piezas de un coche de carreras. Y después de observar maravillado lo que podían conseguir, me planteé si estos materiales tenían un hueco en el mundo de la arquitectura.

Por tanto, mi objetivo al comenzar este TFG, ha sido analizar y sacar conclusiones sobre el origen, la utilización y las aplicaciones en la construcción de estos materiales tan usados en otras disciplinas como la ingeniería aeronáutica, con el fin de unir mis dos grandes pasiones en un solo trabajo.

1. Introducción

1.1 Breve historia de la evolución de los materiales de construcción

A lo largo de la historia, la evolución y desarrollo de las sociedades ha estado relacionada con la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales necesarios para satisfacer sus necesidades, las cuales han ido aumentando con el paso del tiempo. Los materiales de construcción han sido una herramienta de ayuda para el hombre para mejorar su calidad de vida, haciendo prosperar a la especie.

En la antigüedad, los humanos al ser nómadas vivían en cuevas, por lo que sus únicas construcciones eran de uso funerario. Para ello usaban grandes piedras sin tallar. Cuando el ser humano evolucionó al sedentarismo, se asentó y comenzó a levantar muros de piedra con el fin de protegerse de la intemperie, usando morteros arcillosos para aparejar las rocas empleadas. Además, para techar las construcciones utilizaba ramas y cañas, las cuales entramaba en las cubiertas de las cabañas y casas construidas en pequeños poblados[1].

Con la llegada de las primeras civilizaciones, comenzaban a esclarecerse las necesidades básicas de protección y confort. Empiezan a levantarse muros o tapias de adobe además de perfeccionarse el uso de la piedra. También empieza a usarse la madera como elemento de trabajo a flexión.

En la civilización egipcia, además de emplearse grandes rocas en la construcción de las pirámides, se necesitó aislar las viviendas de la población debido al calor en el día y al frío en la noche. Se usó el adobe para levantar muros siendo un buen aislante térmico. Su gran defecto, la poca resistencia a la humedad, no era un problema en un país tan seco[2].

Por otro lado, la civilización griega vivía en casas muy sencillas, pero eran artífices de majestuosos edificios públicos y templos. En un comienzo eran de adobe, pero después eligieron la piedra, la cual se consiguió mediante el labrado de sillares a partir de piedras calizas, para construir sus edificios en toda Grecia. La madera era usada en este caso para armazones y cubiertas, y se combinaba con el adobe y la terracota.

En el caso de la Antigua Roma, el adobe fue empleado en los primeros tiempos hasta que fue sustituido por el ladrillo. Este material se realizaba a partir de barro cocido, el cual también se usaba para la fabricación de tejas o canales. También comenzó a usarse el hormigón, un nuevo tipo de material a partir de mortero de cal y arena con fragmentos de rocas como la toba. Como mortero se empleaba una argamasa formada por la mezcla de cal, arena y agua[2].

Más tarde, durante la edad media, se llevan a cabo una amplia cantidad de movimientos arquitectónicos y se produce una gran evolución en las técnicas empleadas para la construcción. Por lo general, se construían edificios muy bajos de gruesos muros sin apenas vanos para soportar el peso de las cubiertas. Se usaba madera para techumbres, piedras labradas y ladrillos para muros y otros materiales cerámicos como el azulejo, a modo de recubrimiento de cúpulas. Así mismo, se usaba mármol, yeso y pintura como adorno. En la etapa gótica el muro prácticamente desaparece dando lugar a grandes vanos cubiertos por un material en auge, el vidrio. La técnica de la piedra se perfeccionó. Estas eran trasladadas a pie de obra donde el maestro cantero las cortaba y marcaba para ser ubicadas en su lugar correspondiente.

Con la llegada de la revolución francesa y la revolución industrial surgen nuevos materiales en la construcción de excelente resistencia y propiedades mecánicas como el hierro o el hormigón. Las estructuras de hierro surgían de un proceso de producción de piezas a través de la fundición y el vertido de hierro colado. Más tarde, el material fue tratado para obtener acero y aluminio. El uso del hierro permitió abrir grandes recintos como mercados o estaciones. Otro material desarrollado en el siglo XIX es el cemento, un conglomerante que permite crear una pasta formada de la mezcla de caliza y arcilla, y que tiene la propiedad de endurecerse después de ponerse en contacto con el agua. Este material mezclado con agregados pétreos como arena o grava crea el hormigón, una mezcla uniforme y maleable que fragua y endurece adquiriendo consistencia pétreo[1].

La unión del hormigón y el acero dio lugar al hormigón armado, formado a partir de armaduras de acero corrugado que absorben los esfuerzos de tracción y que dan a las piezas mayor ductilidad, y el hormigón como tal, encargado de absorber esfuerzos de compresión y de dar un recubrimiento al acero para evitar la corrosión de las barras[2].

Por último, desde comienzos del siglo XX, con la llegada de nuevas técnicas y estudios sobre materiales y, sobre todo, ayudados por la tecnología, se empiezan a desarrollar nuevos componentes de distintos usos en la construcción, con el fin de aumentar el confort y la habitabilidad para el ser humano. Estos nuevos materiales varían sus usos desde el aislamiento térmico y acústico hasta los refuerzos estructurales frente a acciones como sismos.

Entre los nuevos materiales podemos diferenciar varias ramas siendo una de ellas la perteneciente a los polímeros sintéticos. Éstos permiten fabricar fibras con el objetivo de desarrollar productos funcionales y adecuados para la construcción[3].

1.2 Polímeros sintéticos

Los polímeros son macromoléculas formadas a partir de la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades llamadas monómeros. Los polímeros forman largas cadenas que se unen entre sí por puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals, o interacciones hidrofóbicas[3,4].

Se pueden clasificar según su naturaleza, siendo polímeros naturales el almidón, la celulosa, la seda y el ADN y polímeros sintéticos el nailon, el poliestireno, el polietileno o la baquelita[4].

También se pueden clasificar según su comportamiento al elevar la temperatura distinguiéndose entre[3]:

- **Elastómeros:** plásticos que tienen un comportamiento elástico y pueden ser deformados sin modificarse la estructura o romperse sus enlaces
- **Termoestables:** al calentarlos se descomponen químicamente. Este comportamiento se debe a su estructura con muchos entrecruzamientos, que impide los desplazamientos relativos de las moléculas.
- **Termoplásticos:** al calentarlos pasan a estado líquido, es decir, fluyen y al enfriarlos se vuelven a endurecer volviendo al estado sólido. Su estructura molecular presenta pocos entrecruzamientos. Ejemplos relacionados con la construcción son el polietileno, el polipropileno o el cloruro de polivinilo PVC.

Además, los polímeros pueden clasificarse según sus aplicaciones diferenciándose en adhesivos, plásticos, elastómeros, recubrimientos o fibras.

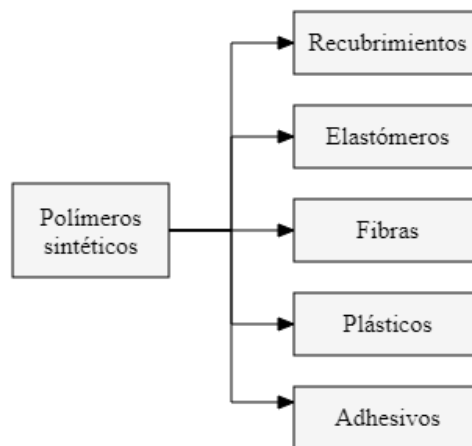


Figura 1. Tipos de polímeros sintéticos según sus aplicaciones.

1.3 Fibras

Centrándonos en las fibras, y más concretamente en las fibras sintéticas, éstas provienen de diversos productos derivados del petróleo, por lo que tanto la síntesis de la materia prima como la fabricación de la hebra o filamento son producto del ser humano.

Podemos clasificar los diversos tipos de fibras según la fórmula de obtención de la molécula[5].

- En primer lugar por **polimerización por condensación**: dos moléculas se combinan para dar un único producto además de una molécula de agua. Con este método obtenemos fibras de poliamida (o de nailon) y fibras de poliéster.
- En segundo lugar por **polimerización por adición**: los monómeros unidos mediante un enlace covalente forman polímeros con distintas estructuras. Por este método se obtienen fibras de elastómeros, fibras de poliolefinas y fibras acrílicas.

Fuera de esta clasificación tradicional se sitúan las nuevas fibras: fibras bicomponentes, derivados del poliacrilonitrilo, microfibras y nanofibras[5].

- **Fibras bicomponentes**: son aquellas que en su estructura polimérica presentan dos polímeros distintos. Entre ellos encontramos la Fibra K-6 o Chinon y la fibra elastoéster.
- **Derivados del poliacrilonitrilo**: en esta categoría encontramos la fibra de carbono, la cual se sintetiza a partir de poliacrilonitrilo mediante la carbonización, que consiste en realizar sucesivos calentamientos en ausencia total de oxígeno. Los cristales de carbono formados se sitúan paralelos al eje de la fibra. A raíz de esto se crea una estructura semejante a la del grafito responsable de su alta resistencia. Los hilos de fibra de carbono pueden tejerse o utilizarse para recubrir otras fibras.
- **Microfibras**: se componen como mínimo de dos materiales distintos: el nailon o poliamida, que le confiere estructura, y el polietileno tereftalato (PET)
- **Nanofibras**: son estructuras nanométricas de filamentos continuos cuyo diámetro es inferior a 500 nanómetros. Se obtienen por electrohilado de diversos polímeros sintéticos.

Entre toda la familia de polímeros sintéticos, en este trabajo vamos a enfocarnos en tres nuevas fibras cuyas propiedades, características y aplicaciones nos ayudan a mejorar y desarrollar la calidad en la construcción.

En primer lugar nos centraremos en la **fibra de carbono**, a continuación en la **fibra de aramida** y por último en la **fibra de vidrio**.

2. Fibra de carbono

2.1 Definición

La fibra de carbono es una fibra sintética fabricada a partir del poliacrilonitrilo, constituida por filamentos de un tamaño entre 5 y 10 μm de diámetro y compuesto principalmente por carbono[6]. Cada fibra de carbono es la unión de miles de filamentos. Varios miles de fibras de carbono se trenzan para formar un hilo, que puede ser utilizado por sí mismo o tejido en una tela. Tiene propiedades mecánicas similares al acero y es tan ligero como el plástico o la madera. Con relación a su dureza, tiene mayor resistencia al impacto que el acero.

Se desarrolló inicialmente para la industria espacial, pero al disminuir su coste de producción, se ha extendido a otros campos, principalmente a la industria de la automoción y al deporte de alta competición, donde tiene muchas aplicaciones y sus propiedades mecánicas y ligereza son muy importantes[8].

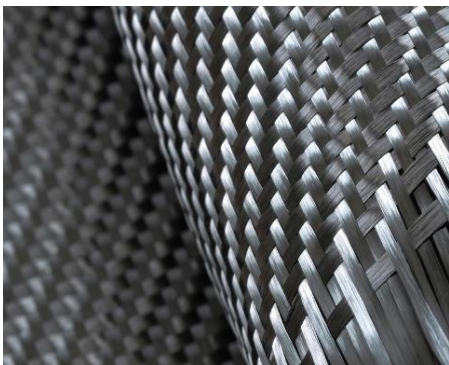


Figura 2. Apariencia visual de la fibra de carbono

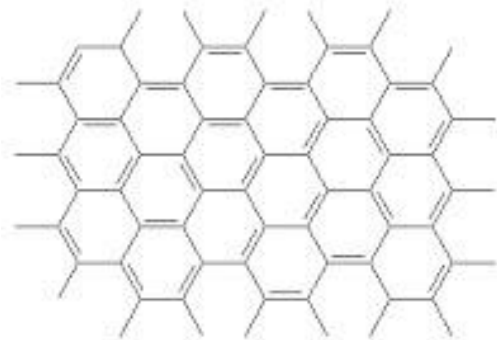


Figura 3. Estructura base

2.2 Historia

En 1958, el físico Roger Bacon creó fibras de alto rendimiento de carbono en el Centro Técnico de la Union Carbide. Estas fibras se fabricaban mediante el calentamiento de filamentos de rayón hasta la carbonización. Este proceso no resultó eficiente, ya que las fibras resultantes contenían sólo un 20 por ciento de carbono y tenían malas propiedades de rigidez y resistencia[7].

En la década de 1960, un proceso desarrollado por la Agencia de Ciencia Industrial Avanzada y Tecnología de Japón usando poliacrilonitrilo como materia prima, creó un producto con un porcentaje de carbono de alrededor del 55 por ciento.

El alto potencial de la fibra de carbono fue aprovechado a partir de 1963 en el desarrollo de aeronaves. El proceso fue patentado por el Ministerio de Defensa del Reino Unido y autorizado a tres empresas británicas: Rolls-Royce, Morganita y Courtaulds. Estas empresas fueron capaces de establecer instalaciones de producción industrial de fibra de carbono. Rolls-Royce se aprovechó de las propiedades del nuevo material para entrar en el mercado americano con motores para aviones, aunque diversos fallos en la investigación y producción llevaron a la empresa a ser comprada por Bristol Composites.

Dado el limitado mercado para un producto tan caro, Morganite también decidió que la producción de fibra de carbono era poco relevante respecto a su negocio principal, dejando a Courtaulds como el único fabricante de importancia del Reino Unido. Esta compañía continuó en la fabricación de fibra de carbono, centrándose principalmente en el desarrollo de dos mercados, el aeroespacial y el equipamiento deportivo. La velocidad de la producción y la calidad del producto fueron mejorando desde entonces[7].

Durante la década de 1970, sucesivos trabajos experimentales para encontrar materias primas alternativas llevaron a la introducción de fibras de carbono a partir de la transformación del petróleo. Estas fibras tenían una excelente resistencia a la flexión llegando a tener alrededor del 85 por ciento de carbono en su composición.

En la actualidad, los principales fabricantes de fibra de carbono son Toray, SGL, Hexcel, Cytac, Toho-Tenax, Mitsubishi Rayon Co y Zoltec[8].

2.3 Estructura

La estructura atómica de la fibra de carbono consiste en láminas de átomos de carbono ordenados en un patrón regular hexagonal.

La diferencia entre la fibra de carbono y el grafito está en la manera en la que las láminas se entrecruzan. El grafito es un material cristalino donde las hojas están situadas paralelamente unas a otras de manera regular y las uniones químicas entre las hojas son relativamente débiles. En cambio, la fibra de carbono es un material amorfo y las láminas de átomos de carbono se colocan al azar. Esta integración de las láminas de carbono es responsable de la alta resistencia[9].

2.4 Síntesis/Fabricación

La fibra de carbono se fabrica mediante un proceso de calentamiento complejo. Al calentarse el poliácridonitrilo (PAN), el calor hace que las unidades repetitivas llamadas ciano formen anillos[7].

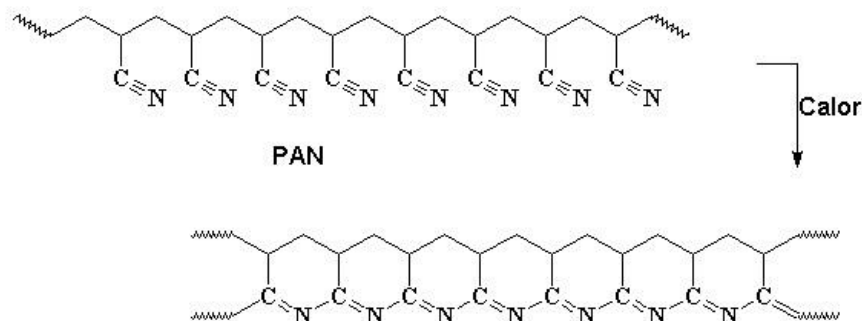


Figura 4. Calentamiento del poliácridonitrilo (PAN)

Aumentando la temperatura, los átomos de carbono se deshacen de sus hidrógenos formándose anillos aromáticos. Este polímero conforma una sucesión de anillos piridínicos fusionados.

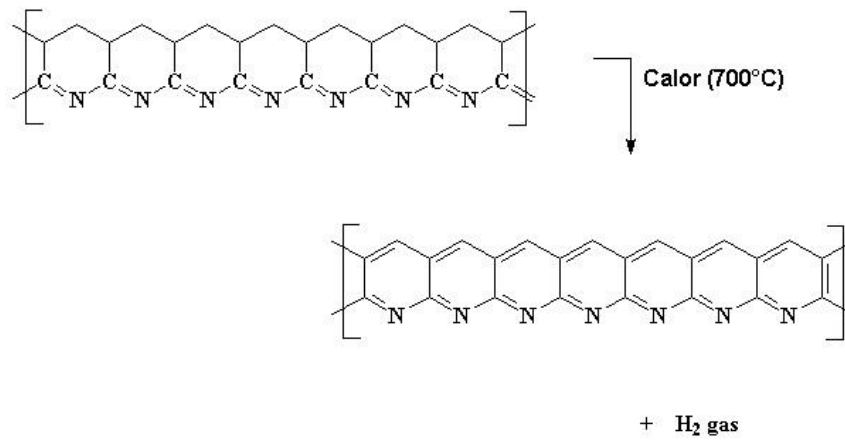


Figura 5. Formación de anillos piridínicos fusionados

Más tarde, al incrementar la temperatura a unos 400-600°C, las cadenas adyacentes se atan.

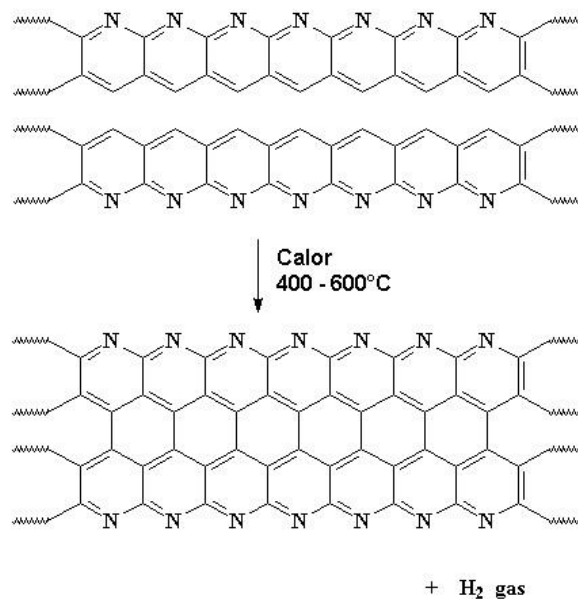


Figura 6. Unión de cadenas adyacentes

El calentamiento llevado a cabo libera hidrógeno y da como resultado un polímero de anillos fusionados en forma de cinta.

Si se incrementa aún más la temperatura de 600 hasta 1300°C, se unen nuevas cintas entre sí para generar cintas más anchas. De esta forma se libera nitrógeno [7].

El polímero obtenido contiene átomos de nitrógeno en los extremos, por lo que las cintas pueden seguir uniéndose, dando lugar a nuevas cintas aún más anchas. A medida que esto ocurre, se continúa liberando más nitrógeno.

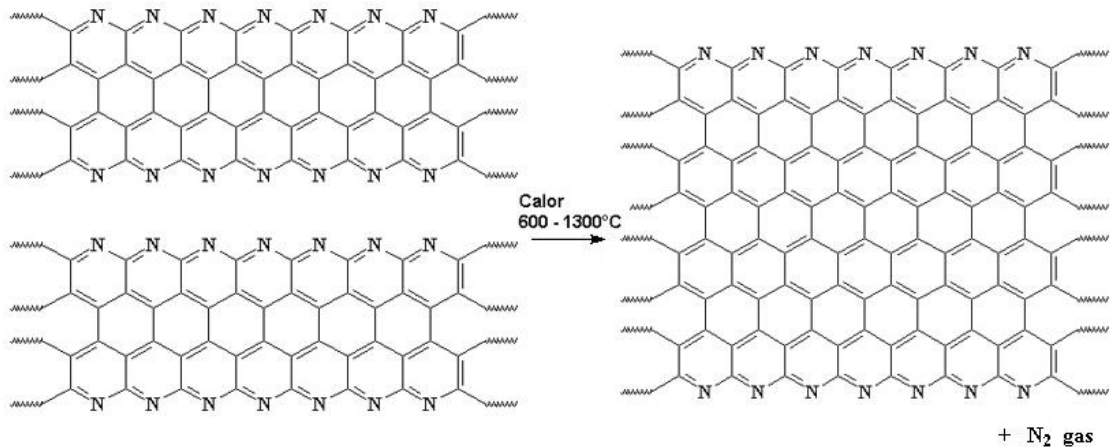


Figura 7. Unión de cintas entre sí

Cuando el proceso se termina, las cintas resultantes son extremadamente anchas y la mayor parte del nitrógeno se ha liberado, quedando una estructura con un porcentaje muy alto de carbono puro en su forma de grafito. Una vez las fibras han adquirido estabilidad, son sometidas a temperaturas de 1000°C bajo una atmósfera inerte obteniendo fibras de resistencia media.

Para conseguir fibras de alta resistencia se requiere realizar un nuevo tratamiento, en este caso con temperaturas próximas a 2500°C en atmósfera sin oxígeno[10].

A continuación, se realiza otro proceso de calentamiento de las fibras llamado grafitización, pero esta vez hasta los 3000°C, donde el tamaño de los cristales aumenta y mejora la orientación de los anillos de la fibra.

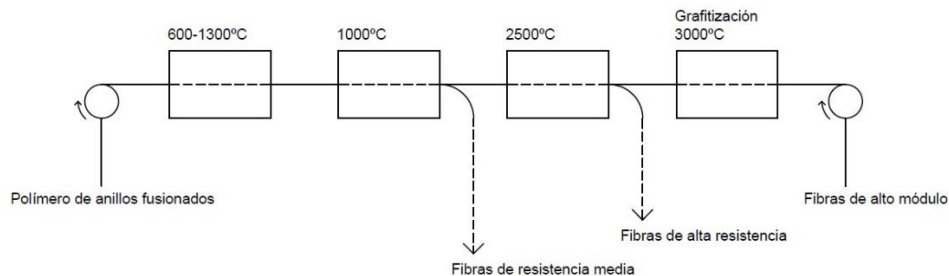


Figura 8. Procesos de calentamiento de las cintas

Finalmente, se le realiza al producto resultante el tratamiento superficial.

La fibra pasa a través de una cámara donde se le aplica un producto catalizador que ayuda a la adhesión de la fibra a la resina. Se teje la fibra formando láminas, las cuales son impregnadas por una resina epoxi en un molde.

El proceso debe controlarse para evitar la formación de defectos como picaduras que podrían causar fallas en la superficie de la fibra[11].

Una vez la resina endurece, se le da forma mecánicamente dando lugar al producto acabado[10].

Existen varios procesos distintos de impregnación de la resina de forma industrial.

- En primer lugar, el método por **transferencia de resina (RTM)**: Se crea un vacío en un molde cerrado y precalentado, con el tejido de carbono seco en el interior, transfiriéndose la resina a presión hasta llegar al molde.

- En segundo lugar, el **método de infusión (RTI)**: La resina en forma de película semidura se coloca en el molde a la vez que el tejido seco. Se aplica calor y presión y la resina se difunde por la fibra hasta impregnarse totalmente.

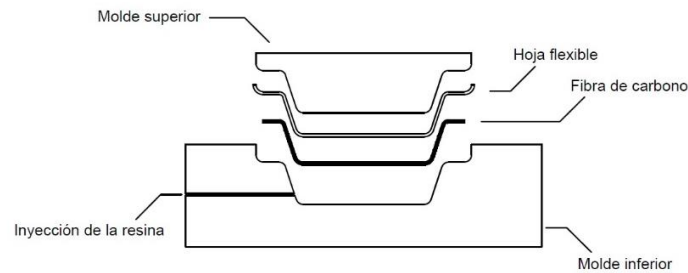


Figura 9. Método por transferencia de resina (RTM)

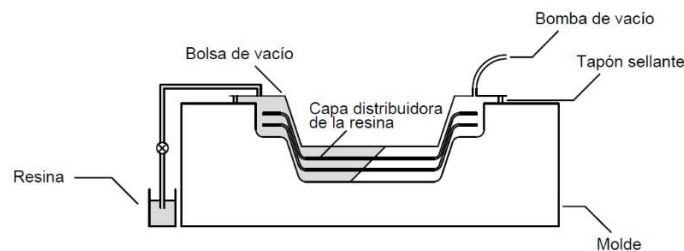


Figura 10. Método de infusión (RTI)

2.5 Propiedades

Entre las propiedades de la fibra de carbono cabe destacar las siguientes [12]:

- Muy elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad entre 230 GPa y 390 GPa, dependiendo del tipo de fibra usada.
- Gran capacidad de resistencia a tracción, unas 10 veces más resistente que el acero; 35.500 kg/cm² contra 4.200 kg/cm².
- Baja densidad, unos 1760 kg/m³ en comparación con el acero, de unos 7850 kg/m³.
- Resistencia a agentes externos.
- Moderada conductividad eléctrica y baja conductividad térmica siendo muy resistente a variaciones de temperatura. Al calentarse, un filamento de carbono se hace más grueso y corto.
- Peso muy liviano (lo que conlleva una mínima carga muerta adicional)
- Alta durabilidad, anticorrosivo y bajo mantenimiento.
- Rápida instalación, con el consiguiente ahorro de dinero y tiempo de espera.
- Mínimo incremento de espesor en la geometría del elemento.
- Versatilidad y flexibilidad, adaptable a todas las formas de los elementos.

2.6 Coste

Las razones del elevado precio de los productos realizados con fibra de carbono se deben a varios factores como el caro y largo proceso de producción, en el cual el polímero sintético es transformado durante semanas o incluso meses, dependiendo de la calidad que se desee obtener, ya que pueden realizarse procesos para mejorar algunas de sus características una vez obtenida la fibra.

No obstante, los costes de producción de la fibra de carbono podrían caer drásticamente hasta en un 90 por ciento gracias a un esfuerzo de investigación conjunta entre el fabricante de automóviles BMW y el gobierno federal alemán, mediante nuevos procesos de fabricación que tienen como clave de la reducción del peso en la automatización de la producción y en la posibilidad de producir componentes más pequeños en masa[13].

Es por esto que está previsto que la producción de fibra de carbono aumente en 25 veces en los próximos diez años. Por tanto, un kilo de fibra de carbono que actualmente cuesta 20 veces más que un kilo de acero podría llegar a costar tan sólo el doble.

2.7 Clases de fibra de carbono

Las clases de fibras de carbono que se producen actualmente, atendiendo a su comportamiento mecánico, son[14]:

- Ultra alto módulo (UHM) con un módulo de elasticidad superior a los 500 Gpa
- Alto módulo (HM) con un módulo de elasticidad superior a 300 Gpa y relación resistencia a la tracción/módulo de tensión menor del 1%
- Alta fuerza a tracción (HT) con valores de resistencia a la tensión superiores a 3 Gpa y relaciones resistencia a la tracción/módulo de 0.015-20
- Módulo intermedio (IM) con un módulo de tensión superior a 300 Gpa y relación de resistencia a la tracción/módulo del orden de 0.01
- Bajo módulo (LM) con estructura isótropa, valores bajos del módulo de elasticidad y de resistencia a la tensión

Tabla 1. Propiedades de los distintos tipos de fibra de carbono en el mercado

Tipos de fibras/ Propiedades	Fibras SM	Fibras IM	Fibras HM	Fibras LM	Fibras UHM
Contenido de carbono(%)	95	95	>99	>97	>99
Diámetro (µm)	6-8	5-6	5-8	11	10
Densidad (g/cm ³)	1,8	1,8	1,9	1,9	2,2
Resistencia a tracción (mpa)	3.800	3.450-6.200	3.450-5.520	1.380-3.100	2.410
Resistencia eléctrica (µcm)	1650	1450	900	1300	220-130
Conductividad térmica (w/m.k)	20	20	50-80	-	-

2.8 Aplicaciones en la construcción

2.8.1 Arquitectura modular – Construcción industrializada

La construcción modular industrializada consiste en la fabricación de los distintos elementos que conforman una vivienda en un medio controlado y estable como es una planta industrial, por medio de un proceso de producción en serie[17].

Entre los diferentes sistemas de construcción industrializada modular existentes actualmente en el mercado, podemos hacer múltiples clasificaciones, siendo muy representativa la que estudia el material estructural empleado. Podemos clasificar dos grandes grupos[12]:

- Sistemas constructivos de estructuras de **entramado**:
 - Sistemas más ligeros, como la **madera**. Su limitación viene dada por la vida útil de la propia madera. A pesar de su relativa ligereza, su vida útil puede disminuir por el ataque de insectos xilófagos o la presencia de humedad intensa.



Figura 11. Sistema modular de madera

- Sistemas de mayor peso, como el **acero**. Son actualmente el material más adecuado para su empleo en la construcción de estructuras modulares. Sus excelentes comportamientos tanto a compresión como a tracción lo hacen adecuado a los esfuerzos a los que se verá sometido durante su fabricación, traslado, puesta en obra y vida útil.



Figura 12. Sistema modular de acero

- Sistemas constructivos de estructuras de tipo **superficial**:
 - Sistemas de **hormigón armado**: La vida útil se ve garantizada por su estabilidad, pero la limitación en la apertura de huecos y el elevado peso para conseguir estructuras resistentes son condicionantes en su uso. Por otra parte, el hormigón ve limitado su comportamiento estructural por su nula resistencia a tracción, haciéndolo depender de las armaduras de acero.



Figura 13. Sistema modular de hormigón

Adicionalmente, se pueden desarrollar y llevar a cabo **sistemas mixtos** entre uno y otro, siempre tratando con materiales de características ya experimentadas.

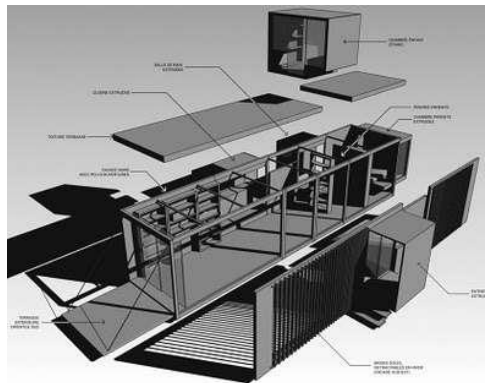


Figura 14. Sistema modular mixto

Además de las anteriores limitaciones, **el peso de cada uno los módulos** que componen el diseño del edificio es uno de los inconvenientes a los que enfrentarse. El peso condiciona las propias instalaciones de fabricación, y limita el transporte y puesta en obra a un precio razonable[12].

Es por esto por lo que la **construcción modular** está derivando su avance a materiales que sean capaces de compaginar una alta calidad de producto con un peso moderado del mismo. Por ello, se están empezando a emplear sistemas más ligeros y de mejores propiedades mediante nuevos materiales como la fibra de carbono, material capaz de resistir los esfuerzos con menor peso, lo cual facilita la manejabilidad y puesta a punto de los módulos que conforman la construcción[15].

Por tanto, la construcción industrializada modular, por su dependencia respecto del peso, puede beneficiarse de la ligereza de las estructuras resultantes de la fibra de carbono.

2.8.2 Refuerzos constructivos y anti-sísmicos

El empleo de fibras de carbono puede darse también en los refuerzos estructurales de diverso tipo[15].

Desde hace 40 años se usan láminas metálicas adheridas al hormigón mediante resinas epoxi. Sin embargo, la lámina metálica presenta problemas como la vulnerabilidad a la corrosión, la necesidad de que la superficie a reparar sea plana, y además, requiere pinturas de protección, inspección periódica y operaciones de mantenimiento. La capa del adhesivo ha de ser muy uniforme, lo cual implica un tratamiento superficial y un control de calidad preciso antes de aplicar el adhesivo. También es frecuente la presencia de burbujas cuando se aplica lo cual disminuye el rendimiento de la unión, para ello se suelen taladrar las láminas de metal, aumentándose el coste y reduciendo drásticamente la resistencia mecánica de la lámina. Además, el metal es pesado para el transporte y la manipulación, necesitándose la aplicación de una presión elevada hasta que la resina de epoxi complete su proceso de curado[16].

La utilización de fibras de carbono soluciona gran parte de estos problemas que pueden darse en los refuerzos estructurales. Su aplicación está basada en sus características, aumentando considerablemente los coeficientes de seguridad y la capacidad portante de los elementos de la estructura con un aporte muy pequeño de cuantía de fibra de carbono. Además, tienen la propiedad de poder colocarse fácilmente sobre las superficies deterioradas gracias a su matriz, y al ser un material muy ligero no suelen suponer un problema para la resistencia estructural global. Otra ventaja es la rápida puesta en servicio sin necesidad de alterar la estructura ya existente.

De esta forma, dentro del ámbito del refuerzo en la construcción se realizan en fibra de carbono bandas a adherir sobre elementos estructurales con patologías previas, con posibles daños por sismo o ejecutados bajo premisas de cálculo erróneas.

Existen fundamentalmente dos técnicas de reparación basadas en la fibra de carbono[16].

- En primer lugar, la aplicación de una lámina de fibra de carbono y resina de epoxi endurecida previamente. En este caso, las superficies irregulares presentan limitaciones debido a la dureza del material compuesto. Normalmente las dimensiones de las placas son de 1 a 2,5 mm de espesor y de 25 a 120 mm de anchura.
- En segundo lugar, la impregnación de la fibra de carbono con resina de epoxi en obra. En este caso, el control de calidad es clave debido a la necesidad de combinar en húmedo la fibra de carbono con la resina.

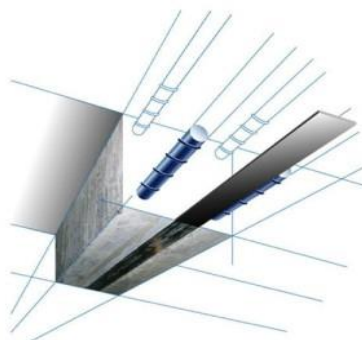


Figura 15. Banda de refuerzo actuando junto a las armaduras.

Ambas técnicas tienen ventajas e inconvenientes. En superficies planas, se aplica mayoritariamente la lámina endurecida mientras que en geometrías curvas se utiliza la impregnación en húmedo en obra. En el mercado existen numerosos productos comerciales mediante los cuales se pueden aplicar las dos técnicas mencionadas. En los últimos años se han implantado numerosas tecnologías textiles con la intención de optimizar la preforma de fibra de carbono a impregnar con la resina en obra.

Las bandas pueden añadirse:

- En las caras **inferiores** de las **vigas** para incrementar su resistencia a flexión.



Figuras 16 y 17. Refuerzos en caras inferiores de vigas

- En las caras **laterales** de las **vigas**, para incrementar su resistencia a corte.



Figura 18. Refuerzos en caras laterales de vigas

- En las caras inferiores de **viguetas**.



Figura 19. Refuerzos en caras inferiores de viguetas

- En **forjados**, especialmente en las caras inferiores de los mismos.



Figura 20. Refuerzos en caras inferiores de forjados

- En **muros** para mejorar su resistencia a flexión y cortante.



Figura 21. Refuerzos en muros

- En **soportes** haciendo aumentar las propiedades mecánicas sin apenas variación de la sección.



Figura 22. Refuerzo en soporte circular



Figura 23. Refuerzo en soporte rectangular

- En **encuentros** entre distintas partes de la estructura.



Figura 24. Refuerzos mixtos

2.8.3 Sustitución de acero por carbono

La implantación de la fibra de carbono en la obra está avanzando más lentamente que la utilización en reparaciones debido al bajo coste de los materiales tradicionales, a la dificultad de fabricación de estructuras de materiales de fibras y al conservadurismo en los países industrializados de las normativas de obra civil y edificación. Sin embargo, se están desarrollando las primeras ejecuciones de puentes, cubiertas de edificios y obras singulares debido a una continua reducción de los costes de producción y puesta a punto de la fibra de carbono. La futura introducción de nueva normativa en fibras para la construcción constituye el pilar principal para el desarrollo de esta industria[16].

Se pueden distinguir varios campos de aplicación directa de la fibra de carbono.

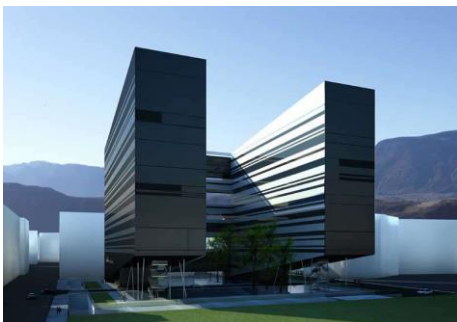
- Por un lado, se están implementando técnicas constructivas como elemento estructural en **puentes** de vehículos convencionales, siguiendo dos líneas distintas.
 - La utilización de parrilla de fibra de carbono como refuerzo del hormigón sustituyendo al armado metálico. Estas parrillas se realizan en varias fases.
 1. Se realiza el trenzado de la fibra mediante un procedimiento automatizado de "weaving".
 2. Se impregna sobre la matriz con resinas, conformándose el material compuesto sobre un molde flexible.
 3. Se aplica presión y calor para conseguir el curado del material.

Varios ejemplos de esta tecnología son el puente en Rollingsford en New Hampshire, EE UU, y el puente de 165 metros de longitud sobre el río Assiniboine en Winnipeg, Canadá. En ambos casos se han colocado sensores de fibra óptica embebidos en los forjados, que permitirán monitorizar el estado del puente durante su vida útil.

- La implantación de perfiles de pultrusión, un proceso consiste en el arrastre de las fibras mojadas de fibras de carbono o híbridos carbono/vidrio a través de un molde. Se está aplicando para puentes peatonales y para vigas transversales de puentes para vehículos. Para ello, se fabrican vigas que incorporan dos rigidizadores para evitar el pandeo de las almas en el propio proceso de pultrusión. Un ejemplo es el puente de 32 metros de longitud en Lake Jackson en Texas, EE UU, donde se dispusieron dos vigas en cada uno de los dos tramos.
- Por otro lado, la fibra de carbono está aumentando su uso en edificación en aquellas aplicaciones constructivas donde se requiere **gran resistencia estructural y bajo peso**. Existen algunos ejemplos de aplicaciones. Uno de ellos es el forjado del suelo de la zona de reptiles del Zoo de Amberes, en Bélgica, el cual necesitaba una resistencia de 1.500 kg/m² y fue fabricado en estructuras sandwich con pieles de fibra de carbono. En el caso del edificio comedor de Toray, Japón, la fibra de carbono se usó para la estructura de la cubierta.
- Otro campo de aplicación de interés creciente son los **edificios singulares** donde predomina el trazado con curvaturas, como en el Museo de Arte de Milwaukee, diseñado por Santiago Calatrava. La construcción consiste en 36 parejas de timones de fibra de carbono conectadas a dos ejes de acero giratorios anclados a la estructura fija. Este sistema está diseñado para abrirse y cerrarse en menos de 4 minutos como las alas de un pájaro de dimensiones gigantes[16].
- Existen otros **usos más restringidos** dentro del campo de la construcción como son:
 - La sustitución de las armaduras de acero afectadas por fenómenos como la corrosión
 - El uso experimental en estructuras construidas en ambientes agresivos, como es el caso de las plataformas marinas.
 - La conformación de algunos soportes o vigas de menores dimensiones.
 - La construcción de espacios efímeros de tamaño reducido.

Es cuestión del tiempo que la fibra de carbono se imponga sobre el resto de materiales estructurales debido a su resistencia, ligereza y moldeabilidad.

Si se realizaran estructuras de carbono en lugar de acero, el peso de la estructura pasaría a ser anecdótico dentro del conjunto y como consecuencia, para las mismas secciones que en el acero, se podrían resolver estructuras en carbono de apenas una quinta parte del peso.



Figuras 25 y 26. Interpretaciones de posibles edificaciones de fibra de carbono

2.8.4 Decoración/ Mobiliario

Existen varias empresas que han llevado a cabo propuestas de fibra de carbono relacionados con la construcción, pero dando lugar a productos con fines decorativos. Un ejemplo es Laeski, una empresa especializada en productos de moda y accesorios fabricados con fibra de carbono, que además se ha extendido al desarrollo de elementos constructivos y mobiliario.

Para realizar los pavimentos se han inspirado en la colección Conectores del artista A.P.O, llevando a cabo una solución donde se sustituyen las tiras, los cuadrados o los rectángulos de algunas de las zonas del suelo por fibra de carbono con una imprimación de color[18].



Figura 27. Pavimento de madera con fibra de carbono

También han diseñado distintos tipos de mobiliario como mesas, estanterías, sofás y sillones. Por último, han creado Carbon Core 2.8, una puerta con núcleo de fibra de carbono que además de la resistencia, estabilidad y ligereza del propio material, destaca por su delgadez, siendo de apenas 28mm de grosor[19].

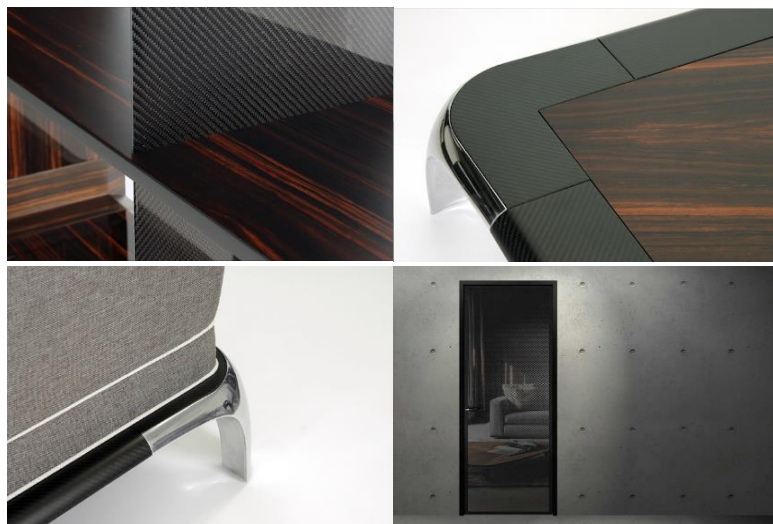


Figura 28. Estantería, mesa, sillón y puerta con fibra de carbono

2.9 Ejemplos de construcciones con fibra de carbono

2.9.1 Edificio de Seiren Fabric Laboratory (Komatsu, Japón)

La compañía japonesa Komatsu Seiren Fabric Laboratory ha creado la nueva fibra de carbono *Cabkoma Strand Rod*. Es un compuesto termoplástico que utiliza fibra de carbono en su interior, mientras que su capa exterior está cubierta con fibra sintética y otra inorgánica. Su acabado se da por la impregnación con resina termoplástica[20].



Figura 29. Detalle del tirante de fibras de carbono



Figura 30. Elemento metálico tensor

Las características buscadas son:

1. Elevada resistencia a tracción, siendo un refuerzo sísmico de altas prestaciones.
2. Cuerpo estructural fuerte.
3. Calidad estética que busca ligereza visual.
4. Ligereza estructural.
5. Minimización de las intervenciones en la estructura existente

Los filamentos de esta nueva fibra de carbono lo convierten en un refuerzo sísmico con una alta resistencia a la tracción siendo un sólido cuerpo estructural. Un rollo de 160 metros de largo de Cabkoma pesa apenas 12 kilos y puede ser fácilmente transportable. En comparación, un equivalente metálico con la misma resistencia pesa aproximadamente cinco veces más[21].



Figura 31. Rollo de filamentos transportable

Figura 32. Comparación entre una varilla Cabkoma y una barra de acero convencional. A pesar de la diferencia de sección, ambos poseen resistencias muy similares

Tabla 2. Propiedades de los distintos productos de Cabkoma

Propiedades/ Productos	Diámetro (mm)	Área de la sección (mm ²)	Peso (g/m)	Fuerza de tensión (kN)	Fuerza de tensión por unidad de área (kN/mm ²)	Inflamabilidad
Cabkoma (Tipo 1-Glass)	5,83	26,7	47,3	38,22	1,43	No inflamable
Cabkoma (Tipo 2-Aramid)	5,18	21,1	30,5	38,08	1,81	No inflamable
Cable normal	6,00	28,3	222	5,67	0,20	

De la mano del arquitecto Kengo Kuma, la nueva fibra fue puesta a prueba en el exterior de la sede de la misma compañía en Japón. Se trata de una propuesta para el refuerzo sísmico basada en el efecto de tensión de las varillas.



Figuras 33 y 34. Vistas exteriores de la fábrica Komatsu Seiren

El antiguo edificio de la oficina central de Komatsu Seiren fue renovado con el producto de fibra de carbono que se estaba desarrollando y se realizó una propuesta considerando el refuerzo sísmico a la vez que manteniendo una calidad estética. Para evaluar las consecuencias se llevó a cabo un análisis estructural que tuvo como objetivo investigar cómo evitar que los materiales de refuerzo afectaran al edificio existente, así como evaluar la resistencia sísmica.



Figuras 35 y 36. Detalles de las fibras antisísmicas Cabkoma

Este sistema se une del techo del edificio al suelo con una serie de varillas flexibles alrededor de la envolvente del edificio, permitiendo que la estructura pueda soportar terremotos de gran intensidad sin temor a problemas estructurales, obteniéndose el refuerzo al unir el nivel del techo y el nivel de cimentación.

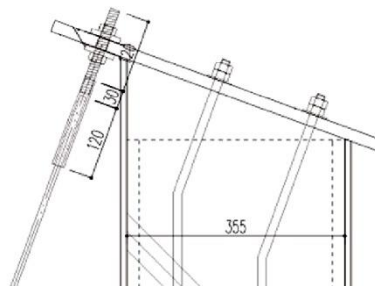


Figura 37. Detalle de los anclajes a nivel de cubierta mediante piezas metálicas

En las siguientes gráficas pueden analizarse y verse con claridad las ganancias de resistencia de la estructura frente a fuerzas horizontales provocadas por un sismo. La ayuda que realizan las varillas Cabkoma de fibra de carbono se ve incrementada cuanto mayor es el esfuerzo a absorber[21].

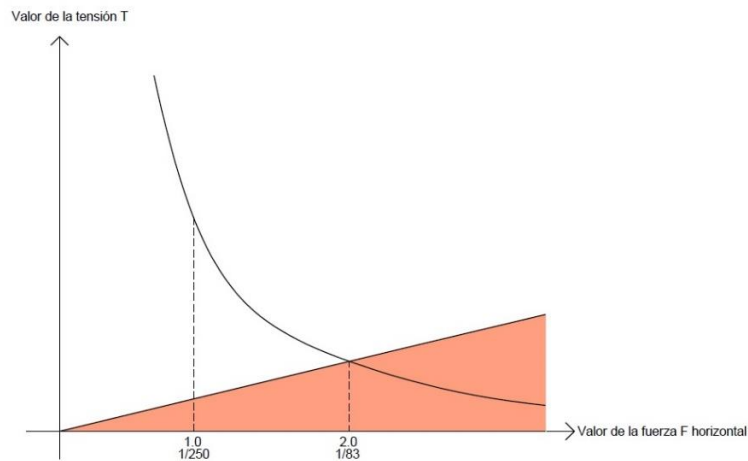


Figura 38. Gráfica sobre el efecto de las varillas en la absorción de fuerzas de sismo

Tras varias simulaciones en cada una de las direcciones del edificio se corrobora el refuerzo que realiza el conjunto de varillas, que se tensa traccionándose y comprimiéndose según si la dirección del esfuerzo es en el eje X o en el eje Y.

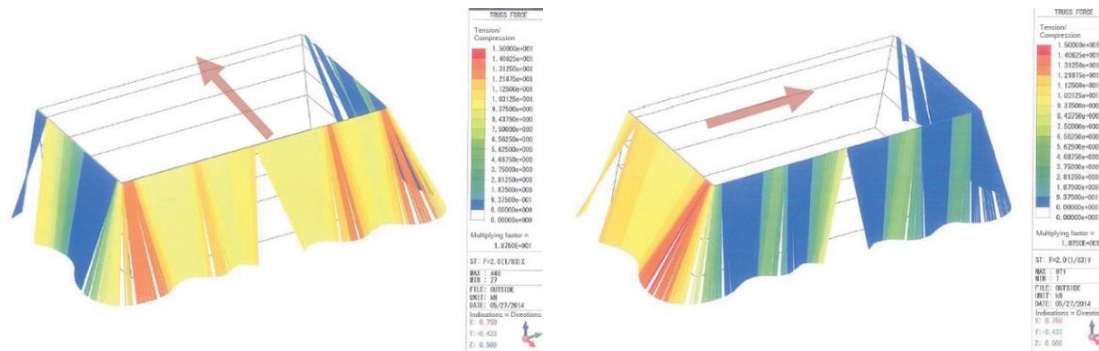
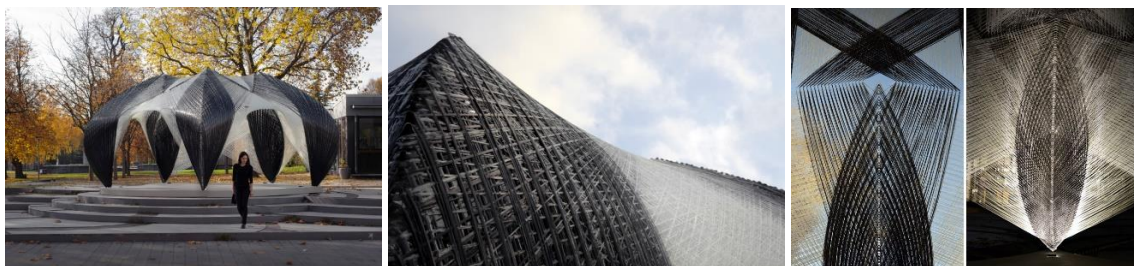


Figura 39. Representación mediante colores sobre el esfuerzo de las varillas en la absorción de fuerzas horizontales de sismo en direcciones ortogonales X e Y.

2.9.2 ICD + ITKE Pavilion (Stuttgart, Alemania)

Se trata de un proyecto de investigación de unos estudiantes del Institute for Computational Design (ICD) y del Institute of Building Structures and Structural Design[23](ITKE), de la universidad de Stuttgart, en Alemania[24]. El pabellón prototipo ha sido realizado en fibra de carbono como resultado de investigaciones acerca de estructuras biológicas para su posterior aplicación en el ámbito de la arquitectura.



Figuras 40, 41 y 42. Estructura conformada por fibra de carbono en forma de artrópodo

A partir del estudio de las estructuras morfológicas de ciertos crustáceos han desarrollado el modelo para la construcción de una cúpula a modo de pabellón. En este caso el estudio parte, del análisis de los exoesqueletos de los artrópodos, concretamente de las pinzas de los crustáceos, a partir de las que se han extrapolado los patrones y el modelo biomimético de la cúpula[22].



Figuras 43, 44 y 45. Proceso de construcción mediante brazo robotizado.

Este caparazón ha sido construido por un brazo robotizado a modo de araña. El robot de 6 ejes colocaba con precisión las fibras de carbono y de vidrio sobre una cimbra de acero mediante el uso como base de un armazón temporal. La cohesión de las fibras se realizaba a partir de la aplicación y el endurecimiento de un compuesto a base de resinas, permitiendo la posterior retirada de la pieza de acero servía de telar. Finalizada la ejecución, se desmontó el armazón dando lugar a una cascara autoportante, que tiene tan solo 4 mm de espesor, ligera, estable y resistente.

2.9.3 Puente Arkitektbron (Goteborg, Suecia)

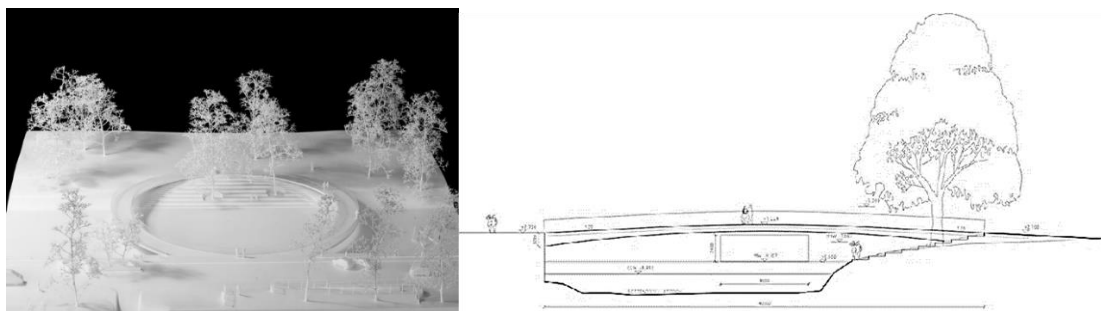
El equipo de arquitectos Erik Andersson ha diseñado un puente circular mediante fibra de carbono en la ciudad de Goteborg[25].

El proyecto busca la creación de un paso peatonal sobre el histórico barrio Vallgraven, que dibujará de forma circular un paso sobre el foso ofreciendo con su abertura una generosa terraza donde los viandantes podrán sentarse a descansar a la orilla del agua. Gracias a esta disposición, el puente, concebido inicialmente como estructura pasante, se convierte en espacio urbano valorizado. El diseño plantea una solución fabricada con fibra de carbono para la disminución de la sección y por consiguiente una mejora en el peso.



Figura 46. Imagen representativa del proyecto

El Arkitektbron incorpora además un sistema interior de calor que permite mantener la estructura libre de hielo y nieve durante los fríos inviernos suecos, y un sistema de iluminación LED.



Figuras 47 y 48. Maqueta proyectual y sección del puente

3. Fibra de aramida

3.1 Definición

Las fibras de aramida son productos de origen sintético obtenidos mediante hilado de poliamidas aromáticas del tipo politereftalato de polifenilendiamina. La aramida, que es una palabra abreviada del término aromatic polyamide, está formada por poliparafenilentereftalamida con una estructura química perfectamente regular cuyos anillos aromáticos dan como resultado cadenas poliméricas de moléculas. Las fibras son fabricadas por diferentes procesos de hilado y extrusión[26].

Asimismo, el Kevlar es un tipo de fibra de aramida, con la que se puede construir productos resistentes y ligeros, capaz de soportar altas temperaturas, sin verse afectados por la corrosión. Su mecanización, que resulta muy difícil, da como resultado enlaces de cadenas rígidas macromoleculares que interactúan entre sí a través de puentes de hidrógeno[27].

Se trata de una poliamida fabricada en un laboratorio de la cual existen dos variedades principales llamadas Kevlar 29 y Kevlar 49. Fue sintetizada por primera vez en 1965 por Stephanie Kwolek, quien trabajaba para la empresa DuPont. La obtención de las fibras de Kevlar fue complicada, necesitando resolverse diversos problemas, hasta que DuPont empezó a comercializarlo en 1972. Debe quedar claro que Kevlar es una marca registrada para un tipo de fibra de aramida. También existen otros productos de propiedades similares como el Twaron[28].

La excepcional resistencia a la rotura y la ligereza de estas poliamidas hacen que sean empleadas ampliamente en sectores como el aeronáutico o la seguridad.

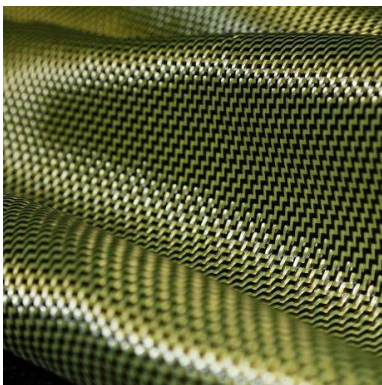


Figura 49. Apariencia visual del kevlar

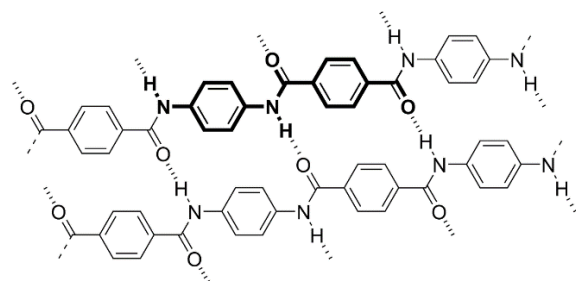


Figura 50. Estructura base

3.2 Historia

A comienzos de los años 60, la compañía estadounidense DuPont[30] estaba interesada en obtener una fibra más resistente que el nailon, ya que se preveía un problema en el suministro de petróleo en el futuro inmediato. Por ello, DuPont creó un grupo de investigación destinado a obtener fibras ligeras y más resistentes que el nailon para la fabricación de neumáticos de automóvil[29].

Hasta ese momento, las soluciones empleadas para la formación de fibras eran transparentes y cuando se obtenían soluciones opacas se descartaban al ser obtenidas a partir de poli(para-fenilen-tereftalamidas) y poli(benzamidas).

La falta de transparencia era debida a la existencia de cristales líquidos y, a pesar de que se solían rechazar, la científica polaco-estadounidense especializada en química Stephanie Kwolek decidió hilar el producto de estas soluciones y obtuvo lo que se denomina "cristal líquido". El resultado final es una fibra aramida 5 veces más dura que el acero, resistente a la fatiga, al desgaste y a la corrosión. Puede ser doblada sin fracturarse y no es conductora. Las cadenas lineales del polímero son dispuestas en paralelo, unidas por puentes de hidrógeno.

Posteriormente, se descubrió que la seda que las arañas fabrican y emplean para elaborar sus telas se obtiene de forma similar a la síntesis del Kevlar a partir de una solución de "cristal líquido", aunque sus composiciones son diferentes.

Más tarde, en 1974 la compañía holandesa Akzo, desarrolló un nuevo método que daba lugar a una nueva fibra llamada Twaron, de propiedades muy similares al Kevlar, pero usando un procedimiento de polimerización empleando como disolvente N-metil-pirrolidona, menos dañino que el empleado hasta entonces por DuPont, la hexametilfosforamida.

Dupont comenzó a usar también este método y esto dio lugar a una "guerra de patentes", que no hicieron más que mitificar más la historia de desarrollo y producción de este material. El descubrimiento supuso un gran avance en el desarrollo de otros materiales poliméricos[28].

3.3 Estructura

Cada monómero de Kevlar conforma una unidad química que contiene 10 átomos de hidrógeno, 2 átomos de oxígeno, 2 átomos de nitrógeno y 14 átomos de carbono.

Todos los grupos amida se encuentran separados por grupos para-fenileno, es decir, los grupos amida se unen al anillo fenilo en posiciones opuestas. Como las poliamidas tienen la capacidad de adoptar dos formas distintas aun siendo el mismo compuesto, se generan dos posiciones llamadas conformación trans y conformación cis.

Cuando los grupos están en conformación trans, el polímero se estira completamente en una línea recta. Es por esto por lo que las cadenas largas y extendidas se sitúan más adecuadamente dando lugar a la forma cristalina característica de las fibras. Sin embargo, siempre se forman enlaces amida con conformación cis, que dificultan el empaquetamiento[31].

No obstante, en el caso del kevlar, cuando se intenta adoptar la conformación cis, los hidrógenos de los grupos aromáticos se interponen. La conformación cis sitúa los hidrógenos uno sobre otro, por lo que de este modo el kevlar permanece prácticamente por completo en la conformación trans. Como consecuencia, las cadenas pueden extenderse del todo formando largas fibras.

Por tanto, una fibra de Kevlar es un conjunto de cadenas de polímeros. Aunque las cadenas de Kevlar son individuales, se encuentran unidas formando un conjunto. Las cadenas individuales se unen por las fuerzas electrostáticas existentes en las moléculas.

3.4 Síntesis/Fabricación

Una sola cadena del polímero de Kevlar puede tener desde cinco hasta un millón de monómeros enlazados juntos. Los grupos aromáticos están intercalados en la cadena principal del polímero en posición 1 y 4[32].

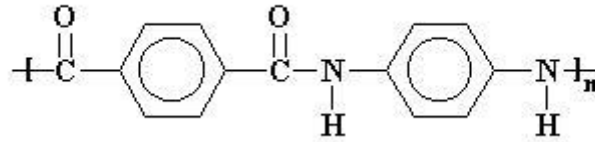


Figura 51. Monómero de Kevlar

Las cadenas del polímero se pueden juntar aleatoriamente o se pueden orientar cuidadosamente en una fila. La orientación de las cadenas del polímero es muy importante para características como la flexibilidad, la rigidez o la fuerza.

Esta colocación espacial es lo que proporciona las moléculas con estructura cristalina. La cristalinidad se consigue mediante un proceso de fabricación que implica obtener una solución fundida del polímero a través de agujeros pequeños de una máquina extrusora.

Ya que las amidas tienen la capacidad de adoptar dos conformaciones aun siendo un mismo compuesto. Por un lado una conformación amida-trans y por otro lado una conformación amida-cis.

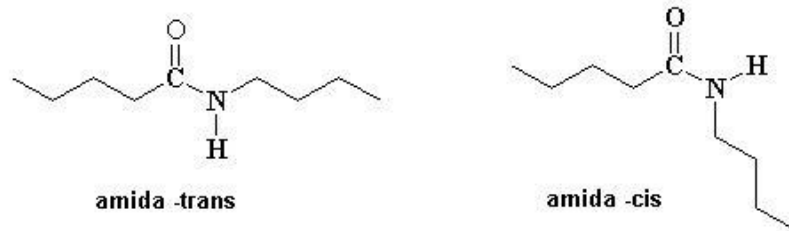


Figura 52. Clases de conformaciones de las amidas

En latín, trans significa "del otro lado", mientras que cis significa "del mismo lado". De esta forma, cuando las cadenas hidrocarbonadas de la amida están en lados opuestos al enlace peptídico, ésta se denomina amida trans, mientras que cuando las cadenas hidrocarbonadas están del mismo lado del enlace peptídico, ésta se llama amida cis[32].

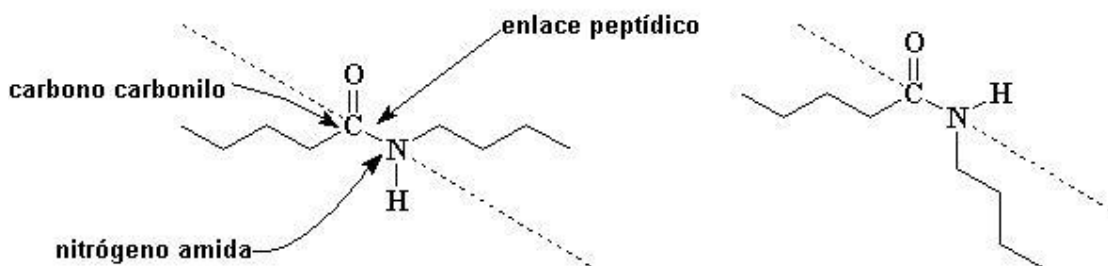


Figura 53. Cadenas hidrocarbonadas en lados opuestos o en el mismo lado

En las poliamidas también existen las conformaciones cis y trans. Cuando en una poliamida todos los grupos amida están en su conformación trans el polímero se estira completamente en una línea recta, como por ejemplo en el nailon 6.6.

Así se consigue el objetivo deseado para las fibras, porque las cadenas largas y completamente extendidas se empaquetan más adecuadamente, dando lugar a la forma cristalina deseada. Sin embargo, siempre existen algunos enlaces amida en la conformación cis.

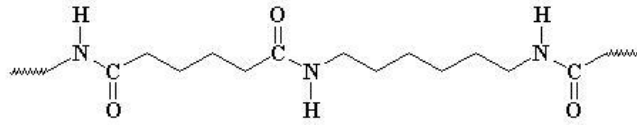


Figura 54. Cadena de nailon en conformación trans

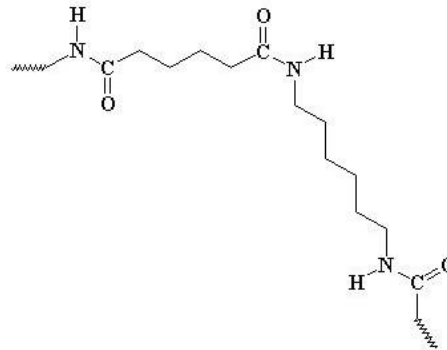


Figura 55. Cadena de nailon con un enlace amida-cis

Por el contrario, en el Kevlar cuando se intenta adoptar la conformación cis, los hidrógenos de los voluminosos grupos aromáticos se interponen. La conformación cis coloca a los hidrógenos de una forma que la fibra permanece casi enteramente en su conformación trans. De esta forma, las fibras del Kevlar se extienden completamente.

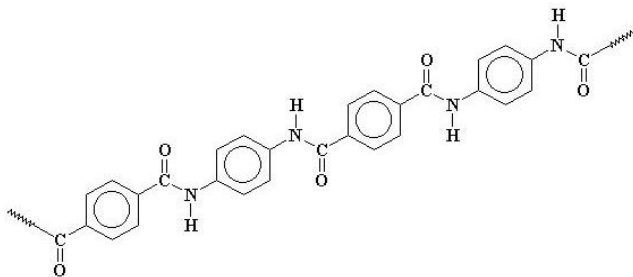


Figura 56. Cadena de kevlar en conformación trans debido a la presencia de hidrógeno

Visto desde cerca, cuando el Kevlar trata de adoptar la conformación cis, no queda espacio para los hidrógenos de los fenilos, de modo que en la mayoría de los casos la conformación trans prevalece frente a la conformación cis.

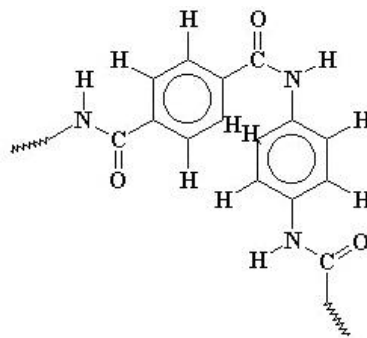


Figura 57. Los hidrógenos del fenilo se entrelazan entre sí en la conformación cis

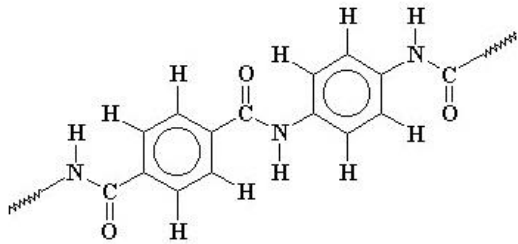


Figura 58. La conformación trans permite que los hidrógenos posean espacio

Una fibra de Kevlar está compuesta por un conjunto de cadenas de polímeros. Aunque las cadenas son en principio individuales, en realidad están unidas formando una fibra de mayor tamaño. Las cadenas individuales del polímero se unen por puentes de hidrógeno, unas fuerzas electrostáticas presentes en las moléculas, que se forman entre los grupos de amidas polares en cadenas adyacentes[32].

Profundizando este tipo de enlace, un puente de hidrógeno se basa en el aumento de la densidad de los electrones alrededor del núcleo en átomos de oxígeno. Puesto que los electrones son de carga negativa, los átomos de oxígeno adquieren carga negativa leve. Por otra parte, los átomos de hidrógeno tienen una densidad mucho más baja de electrones alrededor del núcleo teniendo, por tanto, una carga positiva. Debido a la polaridad las moléculas de hidrógeno y oxígeno se atraen, formando un enlace por puentes de hidrógeno.

Una vez generada la fibra, una solución del polímero formado es disuelta en un solvente a una temperatura entre 50°C y 80°C y es sometida a extrusión en un cilindro a unos 200°C, lo que provoca la evaporación del solvente siendo la fibra resultante enrollada en una bobina. A continuación, la fibra es sometida a un proceso de estiramiento para aumentar las propiedades de rigidez y resistencia[26].

Además, las propiedades de la fibra pueden modificarse variándose las condiciones del hilado, añadiéndose aditivos al solvente o utilizando tratamientos térmicos posteriores al hilado.

3.5 Propiedades

Entre las propiedades de la fibra de aramida caben destacar las siguientes[26, 37]:

- Alta resistencia a tracción, debido a su alto grado de cristalinidad. Por ejemplo, es 5 veces más resistente que el acero.
- Alto módulo de elasticidad y baja elongación a la rotura.
- Gran tenacidad lo que significa baja fragilidad
- Alta resistencia al impacto y alta capacidad de absorción de energía.
- Buena estabilidad mecánica en el rango térmico entre -30 °C y 200 °C. Es recomendable trabajar con este tipo de fibra en un rango térmico estable. Dentro el rango de temperaturas de estabilidad mecánica, la existencia de humedad puede provocar pérdidas de resistencia hasta un 10%.
- Aceptable estabilidad química, aunque es susceptible de ser atacada por ácidos fuertes.
- Resistencia al fuego. No derriten ni se inflaman, y carbonizan solamente a temperaturas muy altas.

- Baja resistencia a compresión y flexión, a diferencia del resto de las fibras que tienen valores similares para la resistencia a la tracción y compresión.
- Baja adherencia a determinadas matrices, como en el caso de las termoplásticas.
- Alta resistencia a la abrasión, además de posibilidad de corte y rasgadura.

Más concretamente, centrándonos en las propiedades del kevlar, podemos destacar[28]:

- Excepcional rigidez teniendo en cuenta su condición de fibra, con un módulo de elasticidad a temperatura ambiente en el entorno de 80 GPa en el caso de kevlar 29, y 120 GPa en el caso de kevlar 49.
- Extraordinaria resistencia a tracción, en torno a 3,5 GPa por los 1,5 GPa del acero. Esta se debe a la orientación de las cadenas moleculares, en dirección del eje de la fibra además del gran número de puentes de hidrógeno.
- Elevada elongación a la rotura, entorno al 3,6% en el kevlar 29 y 2,4% en el kevlar 49, en comparación con el acero donde la elongación se sitúa sobre el 1% de la deformación. Esto significa que el kevlar tiene mayor capacidad de absorción de energía antes de la rotura. La tenacidad del kevlar se sitúa en unos 50 MJ m³, frente a los 6 MJ m⁻³ del acero.
- Descomposición a altas temperaturas, entre los 420°C y los 480°C, manteniendo incluso parte de las propiedades mecánicas en su temperatura de descomposición. El módulo de elasticidad se ve reducido un 20% al emplearse el kevlar a 180°C durante más de 500 horas
- Baja conductividad eléctrica
- Alta resistencia química
- Excelente estabilidad dimensional

3.6 Coste

En relación con el coste de fabricación de productos en fibra de aramida, se han producido grandes avances que han contribuido a una disminución del coste. Uno de los motivos del valor viene dado por la complejidad de la síntesis del material, añadiéndose los posibles tratamientos sobre las fibras que lo forman.

Haciendo una breve investigación podemos observar que el precio de un kilogramo de fibra de aramida, y más concretamente de kevlar, asciende a un valor de entre 15 y 30 dólares[33]. Estableciendo un precio por metro cuadrado obtenemos un precio de 7,5 dólares para un corte de 1x1 metros de 170g/m².

Si los productos buscados son mallas tubulares, el precio por una malla de aramida de 210g/m² de 20mm es de menos de 4 dólares. Por último, en cuanto a cintas de 170g/m² de 2,5cm de ancho el coste es de 10 dólares.

Queda comprobado que, a pesar del moderado precio de los productos de fibra de aramida, éste puede ser asequible para incluirse en los presupuestos de empresas relacionadas con la construcción.

3.7 Clases de fibra de aramida

Según el procedimiento de fabricación, distinguimos dos tipos de fibras aramida en función de la rigidez[26]:

Fibras de bajo módulo (LM), siendo $E = 70$ GPa

Fibras de alto módulo (HM), siendo $E = 130$ GPa

Tabla 3. Valores de propiedades mecánicas para fibras de aramida de bajo y alto módulo de elasticidad

Propiedad	Fibra LM (bajo módulo)	Fibra HM (alto módulo)
Densidad (g/cm)	1,39	1,47
Módulo de Young (GPa)	70	179
Módulo de Young específico (Mm)	5,1	12,4
Resistencia a tracción (GPa)	3,0	3,5

La tabla 3 recoge propiedades como el módulo de Young específico ya que es una propiedad clave para el empleo de materiales compuestos en la industria[34].

Las cuatro principales fibras de aramida, atendiendo a la comercialización por parte de la compañía Dupont, son el Kevlar RI, el Kevlar 29, el Kevlar 49[26].

El Kevlar RI se aplica para el refuerzo de neumáticos.

El Kevlar 29 se usa en vestidos, paracaídas, cuerdas y cables debido a su alta resistencia e intermedio módulo elástico.

El Kevlar 49 tiene un módulo elástico superior que el Kevlar 29 con la misma resistencia y es la fibra usada para materiales compuestos de elevadas prestaciones.

Tabla 4. Propiedades del Kevlar 29 y Kevlar 49

Designación	Kevlar 29	Kevlar 49
Diámetro de hilo (μm)	12	12
Densidad (Kg/m^3)	1440	1450
Módulo de elasticidad (GPa)	60	128
Resistencia a tracción (GPa)	1,92	2,94-3,6
Módulo específico	41	88
Alargamiento a la rotura (%)	4,0	2,8
Módulo de Young (GPa)	83	131

Por otra parte, según las presentaciones industriales, podemos diferenciar entre[26]:

- Fibras continuas

Disponibles en mechas o rovings de filamentos continuos. Estos filamentos se pueden obtener sin acabado y procesarse mediante operaciones textiles distintas gracias a la relativa flexibilidad y poca fragilidad. Las mechas se utilizan en enrollamientos filamentosos y cintas de preimpregnado. Estos tejidos son la forma más utilizada en materiales compuestos con fibra de aramida.

- Fibras discontinuas

El uso de aramida en formas de fibra corta o discontinua, debido a su inherente tenacidad, resistencia a pandeo y naturaleza fibrilar, permite la creación de formas de fibra no posibles en otros refuerzos.

Existen varios tipos de fibras discontinuas:

- Fibras cortas como tal, disponibles de 6,4 hasta 100mm de longitud.
- Mats y fieltros de fibra corta, disponibles para la mezcla con resinas.
- Nomex[39], utilizado en estructuras sándwich de nido de abeja.



Figuras 59 y 60. Mechas o rovings de fibras continuas. Figura 61. Fibras cortas

3.8 Aplicaciones en la construcción

Los materiales de fibra de aramida se consideran de altas prestaciones debido a sus elevadas características mecánicas, especialmente la resistencia a tracción y al impacto, siendo su punto débil la resistencia a compresión.

Es por esto que las principales aplicaciones de estas fibras son los chalecos y cascos antibalas, el desarrollo de cables ópticos, cordones para escalar, cables y cuerdas, llantas, canoas, raquetas de tenis, aplicaciones aeroespaciales, marina, automoción y otras aplicaciones industriales.

En relación a la construcción encontramos diversos tipos de aplicaciones.

3.8.1 Hormigón reforzado con fibra de aramida

3.8.1.1 Historia

El primer trabajo experimental de refuerzo de hormigón usando fibras de aramida se realizó a mitad de los años 70. Se cortaron filamentos de Kevlar49 formando fibras cortas y se mezclaron con la matriz de cemento. Un sistema modificado de riego a presión permitió regular hasta un máximo de un 2% de fibra en el hormigón. A pesar de la incorrecta dispersión de las fibras por el hormigón, el ensayo resultó satisfactorio dando como resultados un módulo de ruptura de entre 40 y 42 MPa, y una tensión última entre 14 y 16 MPa. La durabilidad y resistencia al fuego llegó hasta los 400°C [35].

Más tarde se realizó un estudio en 1986 en Japón, usando filamentos de aramida cortados en longitudes de entre 1 y 10 mm con un contenido de fibras de hasta el 3% de volumen. Se confirmó que las aramiditas eran unas excelentes fibras de refuerzo para el hormigón, considerándose que previamente a su comercialización debían resolverse los problemas en el sistema de proyección e incorporación, así como la determinación de la longitud de fibra óptima.

En 1988 se realizaron pruebas combinando fibras cortas de aramida con la intención de superar los problemas de dispersión de los filamentos individuales de aramida. También se desarrolló una fibra corta de filamentos de Kevlar49 impregnado de epoxy. Los haces trenzados podían ser cortados a la longitud deseada y la superficie exterior de los haces podía también ser tratada para mejorar la adherencia mecánica con el hormigón. Con esta tecnología un volumen alto de fibra podía ser añadido sin problemas de dispersión.

3.8.1.2 Análisis

Se han llevado a cabo varios análisis comparativos de la influencia de las fibras de aramida en el hormigón teniendo como objetivo la evaluación del comportamiento de estas fibras trenzadas con impregnación de epoxy en relación con fibras tradicionales como el polipropileno y el acero. Las fibras se añaden al hormigón como último componente de la mezcla, siendo tomadas las muestras en moldes de acero y vibradas individualmente. Con un equipo habitual de mezclado, el máximo volumen de fibras de aramida está entre el 2% y el 2,5%, igual que en el caso del acero. Debido a que el diámetro de la fibra no puede ser reducido, la proporción de fibra sólo puede variarse según su longitud[35].

Tabla 5. Características de las fibras a comparar

Material	Peso específico (g/cm ³)	Forma	Longitud (mm)	Diámetro equivalente (mm)
Fibra de aramida/epoxy	1,05	Redonda / Recta	25,4	0,6
Acero	7,8	Tira	38,1	0,64
Polipropileno	0,91	Red	38,1	-

Tabla 6. Porcentajes de volumen y peso respecto a la matriz de hormigón

Material	Porcentaje de volumen (%)	Porcentaje de peso (%)
Fibra de aramida	0,28	0,12
	0,55	0,24
	1,10	0,49
	1,66	0,73
	2,20	0,97
Acero	0,46	1,53
	0,68	2,25
	1,02	3,38
Polipropileno	1,46	4,84
	0,21	0,08
	0,42	0,16

3.8.1.3 Ventajas e inconvenientes del hormigón reforzado con fibras

Los hormigones reforzados con fibras cortas proyectadas presentan ciertas ventajas para el hormigón, entre las que destacan[35]:

- Muy buena resistencia a tracción con bajo peso.
- No se oxidan ni son corrosivas. Todas las fibras son estables en ambientes carbonatados y muestran buena resistencia a ambientes alcalinos y ácidos, siendo también resistentes a los medios agresivos con presencia de iones de cloruro. Son un sustituto ideal para la armadura convencional de acero siempre que el hormigón o la estructura esté expuesta a agentes corrosivos como medios marinos, gas carbónico, gases corrosivos o productos químicos
- Son insensibles a las corrientes electromagnéticas.

No obstante, tienen los siguientes inconvenientes a destacar:

- Coste todavía moderadamente elevado (de 2 a 30 veces el del acero).
- Módulo de elasticidad relativamente bajo.
- Ausencia de deformación plástica.
- Alta resistencia axial frente a la resistencia a cortante.
- Degradación en contacto con rayos ultravioleta.
- Falta de experiencia en la utilización de materiales en obra.
- Falta de conocimiento en la concepción y cálculo de estructuras de hormigón reforzadas con fibras.
- Reducción considerable de su trabajabilidad, puesto que los trenzados de aramida son bastante rígidos y no se curvan durante el mezclado.

3.8.1.4 Comparación con acero/ Aplicaciones

El hormigón reforzado con fibras de aramida presenta unas características bastante semejantes al hormigón reforzado con fibras de acero.

En lo que respecta a las propiedades habituales del hormigón, las fibras de aramida modifican principalmente el comportamiento frente a fisuración. Para la misma proporción de fibras, el fallo se produce antes en el hormigón con fibras de acero por la separación de éstas[35].

Siguiendo la comparación, se observa que las fibras de aramida tienen una mayor resistencia a fractura. Como resultado de la relación de 15 a 1 en el módulo elástico entre ambos refuerzos, a igual contenido por volumen, tanto la resistencia a la primera rotura como la tenacidad del hormigón reforzado con fibras de aramida son superiores. No obstante, los resultados a impacto demuestran que el comportamiento de las fibras de acero es superior al de las de aramida.

La ventaja más clara de la aramida sobre el acero está en la reducción de los problemas de corrosión. Por contra, el uso generalizado de la aramida se ve todavía frenado por los costes tanto materiales como de fabricación y procesado que todavía posee.

Sin embargo, la posibilidad de extender su uso en elementos de gran esbeltez puede tener un papel fundamental en el futuro. Otro campo de aplicación de las fibras de aramida como refuerzo del hormigón es el de usos como refuerzo de fibra larga o formando cables y tendones.

3.8.2 Protección contra el calor y el fuego

Existen varias formas de protección frente al calor:

Por un lado, las fibras de aramida son resistentes a las llamas de forma intrínseca por sus estructuras químicas. La estructura real de la fibra en sí misma no es inflamable, la protección está incorporada en la misma fibra y no puede rasgarse ni desgastarse. Cuando la fibra está expuesta al calor se hincha y engorda, formando una barrera protectora entre la fuente de calor y la piel. Esta barrera protectora se mantiene hasta que se enfría, lo que brinda a la persona un tiempo valioso de protección para lograr escapar[36].

Por otro lado, existen fibras tratadas con retardador de llama (FRT). Estos materiales se convierten en resistentes a las llamas mediante la aplicación de productos químicos retardadores, gracias a la utilización de un aditivo químico en la fibra o un tratamiento en la fibra para proporcionar algún nivel de retardo. Durante un incendio, las fibras necesitan una reacción química para extinguir las llamas. Esta reacción es variable según el calor del incendio y la cantidad de tiempo que la fibra está expuesta al fuego.

Algo a tener en cuenta es que las propiedades resistentes a las llamas de las fibras resistentes no pueden desgastarse, es decir, la protección resistente a las llamas siempre está disponible. Otro punto esencial a tener en cuenta es que no pueden desgastarse ni dañarse por medio de la exposición a productos químicos. Sin embargo, las fibras pueden dañarse con el cloro, la combinación de peróxido de hidrógeno con agua dura o la exposición a productos químicos oxidantes.

3.8.3 Formación de barras de aramida

Existen varios productos de barras fabricados con fibra de aramida.

Uno de ellos es la fibra Arapree como refuerzo de armaduras permanentes. Las barras y estribos se fabrican con fibra de aramida además de resina de vinilester para una elevada duración. La aplicación de estas barras se realiza como refuerzo de armaduras existentes o en la recuperación de edificios históricos[37].



Figura 62. Barras de fibra de aramida de distintos diámetros

Presentan una superficie completamente recubierta con arena de cuarzo para que su adhesión aumente. Sus altas prestaciones mecánicas junto con su ligereza convierten este producto en un elemento particularmente eficaz siempre y cuando se respete la estructura existente. Se realizan en varios diámetros, formas y mediciones.

3.8.4 Refuerzos constructivos

Otra aplicación de la fibra de aramida es la conformación de tejidos como material de refuerzo bajo flexión y cortante, o para aumentar las prestaciones de compresión. Un ejemplo es el tejido FRP Arapree, usado para absorber flexiones, cortantes y subir las prestaciones de compresión en columnas mediante vendaje externo[38].

Gracias a la fibra se mejora la compresión axial de las columnas y se consigue una mejor eficiencia que usando estribos de acero puesto que los tejidos permiten un confinamiento continuo por toda la altura de la columna. Además, la resistencia a la tracción y el bajo módulo de elasticidad implican una mayor ductilidad de la columna ofreciendo así una tolerancia más alta a deformaciones, especialmente en terremotos.

Estos tejidos se utilizan también para mejorar la resistencia a la flexión de estructuras existentes permitiendo aumentar la capacidad de resistencia de vigas y placas. El producto se realiza en una gran variedad de gamas con distintas características técnicas y pesos.

3.8.5 Nido de abeja de aramida Nomex

El nido de abeja Nomex es un producto muy ligero, rígido y resistente hecho con fibra de aramida impregnada de resina fenólica. Ofrece una combinación única de propiedades de aislamiento eléctrico, así como estabilidad y resistencia térmica, a la radiación y a la llama muy altas. Sus propiedades de tracción son similares a las de las fibras textiles normales[39].

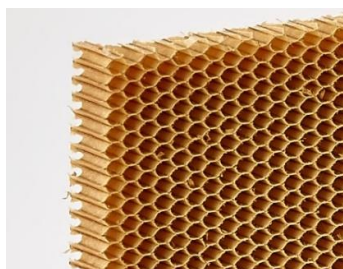


Figura 63. Nido de abeja Nomex

El producto está utilizado sobre todo en los refuerzos estructurales en el sector aeronáutico, y tiene como aplicación en la construcción el aislamiento eléctrico. En sus variadas formas, sobre todo los papeles y los cartones prensados, podemos usarlo para aislamiento en transformadores, motores eléctricos, generadores y todo tipo de equipos eléctricos.

Tabla 7. Propiedades del nido de abeja de diferentes tamaños

Propiedad	Valor	
	6	5
Tamaño de las Celdas (mm)	6	5
Densidad del núcleo (g/cm ⁴)	0,024	0,032
Espesor de la pared (mm)	0,05	0,05
Módulo de cizalla de la placa longitudinal (MPa)	25	34
Módulo de cizalla de la placa transversal (MPa)	14	20
Resistencia a la Cizalla de la Placa longitudinal (MPa)	0,7	1,1
Resistencia a la Cizalla de la Placa transversal (Mpa)	0,35	0,6
Resistencia a la Compresión (MPa)	0,7	1,1

3.9 Ejemplos de construcciones con fibra de aramida

3.9.1 Estadio olímpico de Montreal (Quebec, Canadá)

El Estadio Olímpico de Montreal, diseñado por el arquitecto francés Roger Taillibert, y construido para ser el escenario principal de los Juegos Olímpicos de 1976, fue diseñado con techo replegable de kevlar, el cual sería abierto y cerrado por la estructura inclinada más alta del mundo, una enorme torre de 175 metros[40].



Figura 64. Estadio olímpico de Montreal

El estadio no fue completado a tiempo para los juegos debido a huelgas de los trabajadores de la construcción y tanto la torre como el techo no fueron terminados hasta una década después. En el año 1987, cuando concluyó la instalación del techo replegable anaranjado de kevlar tal como se planeó en los planos originales, cubría una superficie de 23.270 m². No fue posible replegar el techo hasta 1988, lo que supuso el final de las obras constructivas en el estadio después de más una década. Este techo de 65 toneladas resultó ser difícil de replegar, y no podía ser operado en presencia de vientos con velocidades superiores a 25 mph.

El techo retráctil de membrana de Kevlar tenía una forma con 26 puntos de suspensión y 17 cables de borde anclados en el techo de hormigón. El techo se bajaba desde la torre inclinada de 168 m de altura sobre cables completamente bloqueados, mientras los puntos de suspensión se mantenían mediante cables de conexión. Las costuras de la membrana se hicieron como una mezcla de costura y soldadura de alta frecuencia. El techo se desplegó automáticamente en 30 minutos[41].



Figuras 65 y 66. Techo retráctil de kevlar en diferentes fases

En invierno, el techo se podía aislar con una membrana de PVC adicional, que se sujetaba bajo la membrana de Kevlar mediante una red de cable también de Kevlar. Esto daba como resultado un techo de membrana de doble capa ventilada, que reducía las pérdidas de calor y evitaba la condensación[42].



Figura 67. Techo retráctil en su posición recogida.

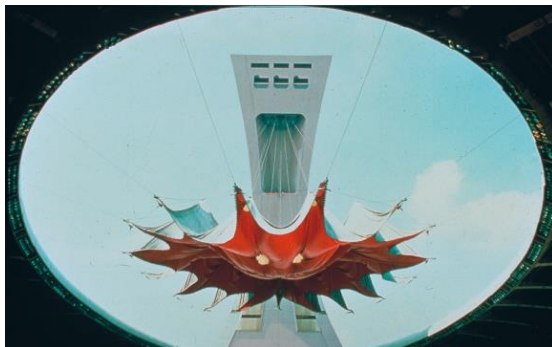


Figura 68. Techo retráctil en fase temprana de estiramiento



Figura 69. Techo retráctil en fase avanzada de estiramiento

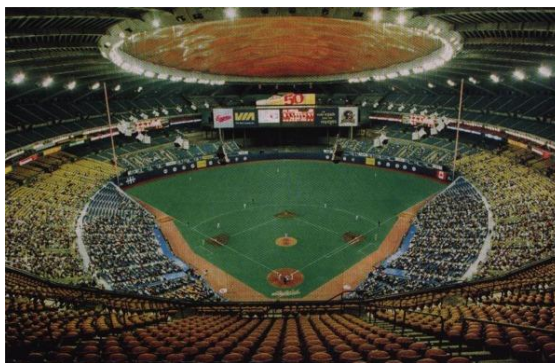


Figura 70. Estadio en funcionamiento con el techo completamente desplegado

No obstante, poco después de que el techo fuera puesto en funcionamiento se rasgó en varias ocasiones debido a imperfecciones de diseño. Durante los meses siguientes sufrió más rasgaduras e incluso goteras durante las lluvias, permitiendo la entrada de agua al estadio[40].

Ese año, unas vigas se partieron y causaron que un bloque de hormigón de 55 toneladas cayera sobre la parte exterior del estadio. No hubo heridos, pero se decidió mantener siempre el techo cerrado. Más adelante, el techo de kevlar fue retirado convirtiéndose en un estadio al aire hasta que fue instalado un techo azul opaco inamovible de 26 millones de dólares.

En cuanto a las cualidades artísticas del estadio, la estructura de techo textil fue diseñada para permanecer suspendida entre el componente a modo de soporte de carga vertical (la torre) y un componente colgante tensado y móvil (la membrana de Kevlar). En cierto modo, en un primer momento el conjunto fue un éxito, aunque más tarde este diseño de techo particular no salió bien parado de las temperaturas extremas de invierno tan frecuentes en Quebec.

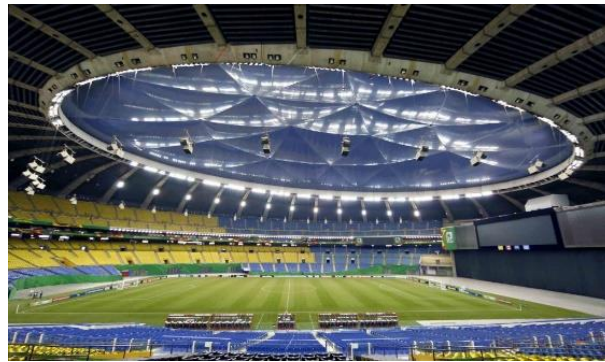


Figura 71. Estadio con el nuevo techo azul

Hace poco se supo que el gobierno de Quebec dio su aprobación para iniciar la renovación del techo del estadio olímpico. La idea aprobada para cambiar el techo es la de un modelo de techo fijo también de kevlar como el original, pero con la capacidad de ser retirado para ocasiones especiales, por lo que retirar la cubierta del estadio será un proceso largo que tendrá que planificarse con tiempo[43].

La idea de un techo retractable de rápido desplazamiento fue descartada por el alto coste. Aun así, se estima que se invertirán más de 200 millones de dólares para completar estas renovaciones.

Algunos datos sobre la membrana de fibra de kevlar original son[41]:

Área de la membrana: 23.270 m²

Proyección horizontal: 200 x 140 m, con forma elíptica

Número de cables: 26

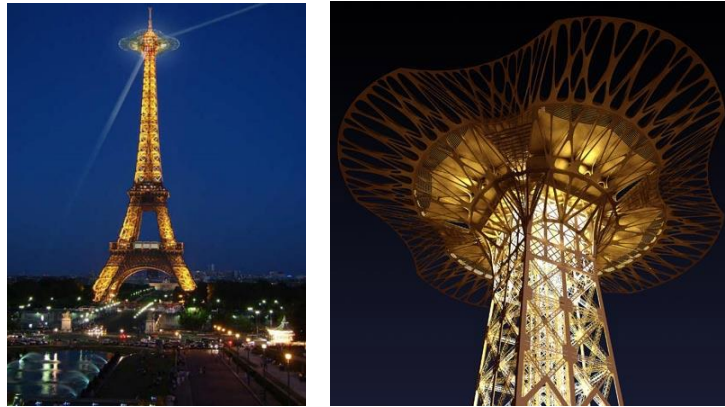
Número de cabrestantes: 43

Tiempo de obertura: 30 minutos

3.9.2 Transformación de la Torre Eiffel (París, Francia)

Para celebrar el 120 aniversario de la torre Eiffel de París, la Société d'Exploitation de la Tour Eiffel propuso un concurso ficticio para remodelar la parte superior de la torre.

Los arquitectos Serero ganaron el concurso, con una propuesta llamada Eiffel DNA, que implica atornillar una estructura temporal de Kevlar en la parte superior de la torre, doblando el área de superficie de las plataformas de observación[44].



Figuras 72 y 73. Plataforma de kevlar sobre el tercer piso de la torre Eiffel

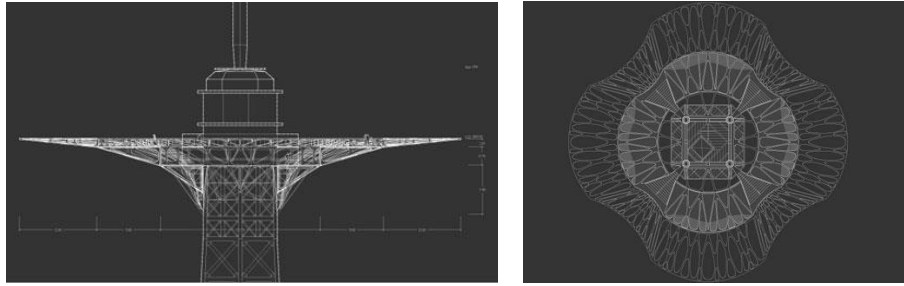
El motivo del concurso fue buscar una solución a la cantidad de visitantes que llegan a alcanzar su cima aumentando su capacidad límite. Las personas suelen esperar más de media hora para llegar a los ascensores. Además, el área del piso de cada nivel disminuye con la altura debido a la geometría de la torre, lo cual provoca largas colas de espera.

Es por esto que el concurso se enfocaba en reestructurar las áreas de recepción y acceso público de la torre. La propuesta de Serero Architects tiene como objetivo crear una extensión horizontal de Kevlar en el tercer piso de la torre para aumentar la calidad del acceso del público y experimentar las vistas sobre París.



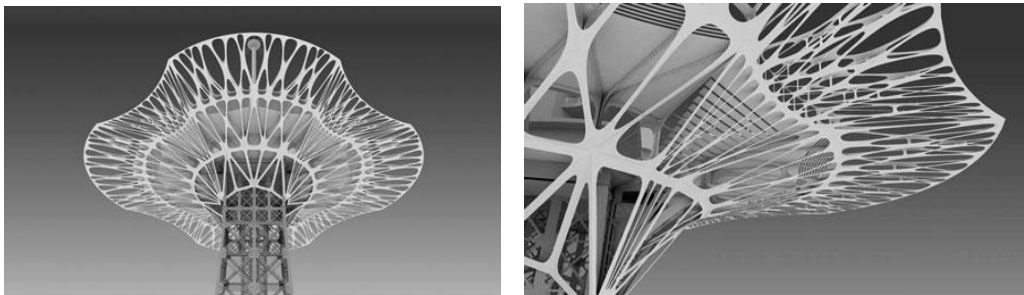
Figuras 74 y 75. Aspecto de la extensión de kevlar sobre la torre Eiffel

El proyecto extendería una placa del piso superior de la torre mediante una estructura de Kevlar de alto rendimiento. La estructura se atornillaría a la losa del tercer piso sin requerir ninguna modificación de la estructura existente, expandiendo el área útil del piso de 280 m² a 580m².



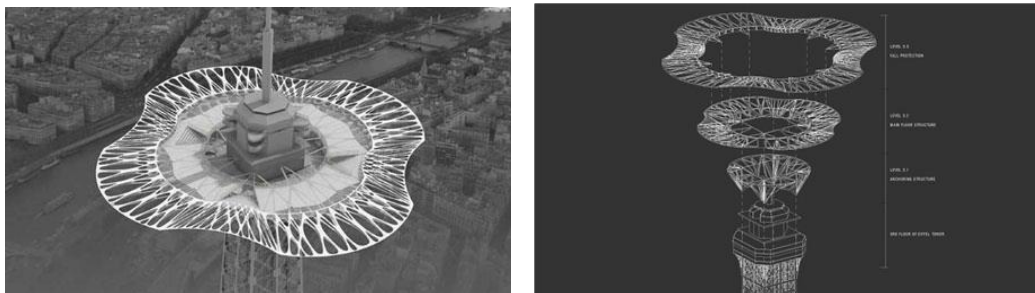
Figuras 76 y 77. Alzado y planta de la plataforma de kevlar

El diseño fue creado usando un script generativo de computadora que tomó la estructura existente de la torre y la transformó para que la nueva adición de Kevlar replicara el patrón del original. Se basa en un guion generativo, creando ramas de la estructura primaria de la torre. Está inspirado por el concepto estructural de Eiffel de haces tridimensionales de refuerzo[44].



Figuras 78 y 79. Diseño estructural de ramas siguiendo el patrón de la torre

El script utilizó la estructura existente en la parte superior de la torre (un cubo de 10 por 10 metros) para generar 3 tejidos estructurales interconectados de fibra de kevlar. Estas capas se combinan para crear un complejo tejido provoca una buena resistencia estructural. En oposición a la ingeniería moderna, basada en el concepto de repetición y optimización, el proyecto para la extensión de la torre Eiffel se basa en un modelo alternativo de alto rendimiento.



Figuras 80 y 81. Axonometría de las 3 diferentes partes de tejido de kevlar que conforman la estructura

Algunos datos sobre esta nueva estructura de Kevlar son:

Superficie: 589 m² (282m² existentes más 307m² nuevos)

Estructura: Formada por Kevlar, conectores de acero y malla metálica

Presupuesto: 1,3 millones de euros

Densidad del Kevlar: 240 g/ m²

Peso total de la nueva estructura = 1.200 Kg

3.9.3 Disaster-Resistant House

La firma de arquitectura 10design, con sede en Hong Kong, prevé una respuesta futurista a una catástrofe en un futuro que puede verse sacudido por desastres naturales, provocados por un clima cambiante. Mediante su casa-loft con revestimiento de Kevlar, el habitáculo puede adaptarse al clima extremo al replegarse en el suelo[45].



Figuras 82 y 83. Módulo futurista con estructura de Kevlar

Usando sensores climáticos, esta casa está diseñada para adaptarse a los cambios ambientales que la rodean. A la primera señal de problemas, utiliza palancas hidráulicas para ocultarse en el suelo. El techo puede sellarse para que sea resistente al viento y al agua, y la estructura está diseñada para permanecer allí hasta que los sensores digan que es seguro emerger nuevamente.

Una de sus características es la forma aerodinámica, por la cual la casa puede soportar fácilmente 150 mph sin llegar a colapsar. La geometría está inspirada en veleros y mantiene la estructura de Kevlar para hacer la construcción más ligera y fuerte.

10design concibe vecindarios enteros contruidos como una serie en red de estas cápsulas sensibles al clima, donde la población está protegida mediante la piel de Kevlar de tornados y tormentas. La firma está colaborando actualmente con constructores de barcos en África y los Estados Unidos para construir un prototipo y convertir esta idea en realidad.

4. Fibra de vidrio

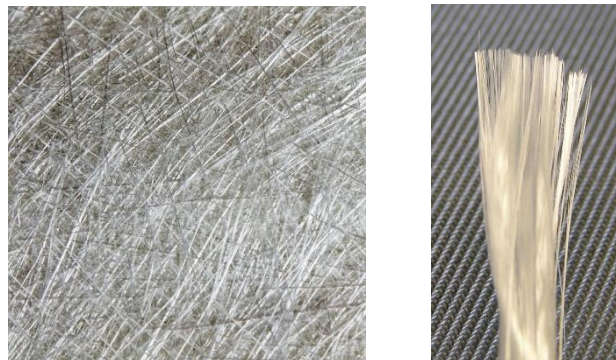
4.1 Definición

La fibra de vidrio es un material que se fundamenta en la disposición de numerosos filamentos poliméricos extremadamente finos basados en dióxido de silicio (SiO_2), un compuesto de silicio y oxígeno llamado comúnmente sílice, que junto a otros materiales forma la arena y es usado entre otras aplicaciones para producir vidrio o fibra óptica[50].

Las fibras de vidrio también pueden crearse naturalmente, como el pelo de Pele, un término geológico de hilos o fibras de vidrio volcánico que se forman cuando pequeñas partículas de material fundido son lanzados al aire en erupciones volcánicas[51].

Se utiliza comúnmente como material aislante y como agente de refuerzo para muchos productos poliméricos, para formar un material compuesto muy fuerte y ligero denominado plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Tiene propiedades comparables a los de otras fibras como las fibras de polímeros y de carbono, aunque no es tan fuerte o tan rígida pero sí mucho más barata y mucho menos frágil. Es por esto que es el refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos, sobre todo en aplicaciones industriales.

Los tipos de fibra de vidrio más comúnmente utilizados son principalmente de vidrio E mientras que la empresa Owens-Corning es la mayor productora de fibra de vidrio del mercado.



Figuras 84 y 85. Apariencia visual de la fibra de vidrio

4.2 Historia

La historia de la fibra de vidrio se remonta a la época del antiguo Egipto, donde descubrieron sus virtudes de resistencia para armar vasos y ánforas en las tumbas de los faraones. Por otro lado, las fibras tejidas datan del siglo XVIII en Francia[52], pero los fabricantes de vidrio no experimentaron con fibras de vidrio hasta que se inventó la maquinaria con la tecnología necesaria para la producción y fabricación en masa. En 1893, Edward Drummond Libbey exhibió un vestido en la Exposición Mundial Colombina (Feria Mundial de Chicago) con la incorporación de fibras de vidrio con el diámetro y la textura de las fibras de seda[51].

Sin embargo, la lana de vidrio continua, lo que se conoce comúnmente hoy como fibra de vidrio, fue inventada y producida como un material aislante a partir de 1938 por la unión de las compañías americanas Owens-Illinois Glass Company y Corning Glass Works se unieron para formar Owens-Corning Fiberglass y gracias al científico Russell Games Slayter. Es comercializada bajo la marca registrada de nombre Fiberglass.

El primer tipo de vidrio utilizado para la fibra fue vidrio sodio-cálcico o vidrio A pero ya que este no es muy resistente a los álcalis se formuló un nuevo tipo, el vidrio E, un vidrio de aluminio-borosilicato que prácticamente no tiene constituyente alcalino. La letra E viene de sus primeras aplicaciones de uso eléctrico. El vidrio E todavía constituye la mayor parte de la producción de fibra de vidrio en el mundo[51].

4.3 Estructura

La base de la fibra de vidrio es la sílice (SiO_2).

Aunque no tiene punto de fusión, al aplicarle calor se ablanda hasta llegar a unos 2000°C , donde comienza a degradarse. Pasando los 1700°C la mayoría de las moléculas pueden moverse libremente. Si el vidrio es extruido y se enfría rápidamente a esta temperatura, será incapaz de formar una estructura ordenada. En el polímero se forman grupos SiO_4 que se configuran como un tetraedro situándose los cuatro átomos de oxígeno en las esquinas con el átomo de silicio en el centro. Estos átomos forman unas redes compartiendo los átomos de oxígeno[51].

Con el fin de inducir la cristalización, la sílice debe ser calentado a temperaturas superiores a 1200°C durante largos periodos de tiempo.

A pesar de que la sílice pura es un vidrio perfectamente viable para la fibra de vidrio, este tiene el inconveniente de que deber ser calentado a temperaturas muy altas. Al ser enfriado rápidamente la sílice no es capaz de formar una estructura ordenada formando un estado amorfo. La sílice pura es un vidrio perfectamente viable para la fibra de vidrio, pero aun así lo habitual es introducir impurezas como el carbonato de sodio en el vidrio para bajar la temperatura de trabajo además de dar resistencia al vidrio.

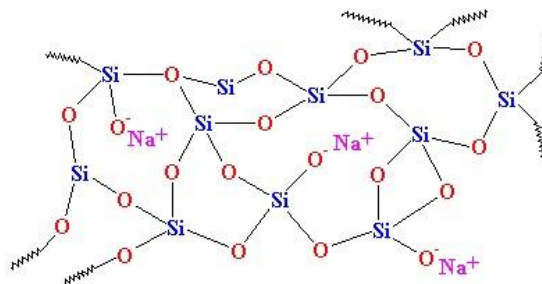


Figura 86. Estructura de la fibra de vidrio

4.4 Síntesis/Fabricación

El proceso de fabricación comienza con las materias primas en estado sólido, donde los materiales se mezclan y funden en un horno. Existen dos métodos principales de fabricación de fibra de vidrio, mediante un proceso de fusión directa o por un proceso de refundición[51].

En el proceso de refundición, el material fundido es cortado y enrollado formando pequeñas bolas, que son enfriadas y envasadas. Estas canicas son llevadas a las instalaciones de fabricación de fibra donde el material es refundido al introducirse en un cilindro. El vidrio fundido es extraído a través de un cabezal con boquillas de metal, llamado bushing, que lo conforma en filamentos. En este proceso, el bushing actúa como un horno que derrite más el material.

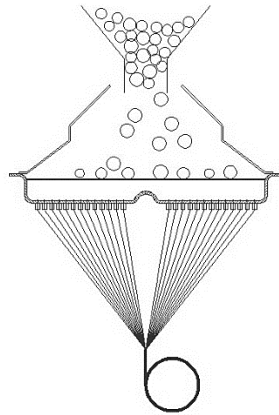


Figura 87. Proceso de fundición indirecta

En el proceso de fusión directa, el vidrio fundido del horno va directamente al buje de conformación, que sirve como colector de vidrio fundido. Este calienta en cierta medida para mantener el vidrio a la temperatura correcta para la formación de fibras.

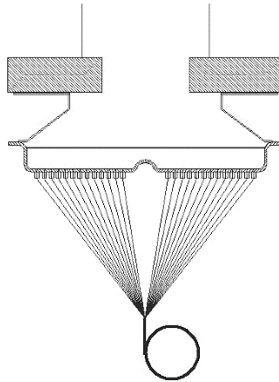


Figura 88. Proceso de fundición directa

El bushing es la parte más importante de la maquinaria para la fabricación de la fibra. Se trata de un cabezal calefaccionado de metal que contiene las boquillas para que los filamentos de fibra se formen a través de estas. Al estar expuesto a altas temperaturas, para mayor durabilidad, está fabricado de platino aleado con rodio.



Figura 89. Bushing de doble plato

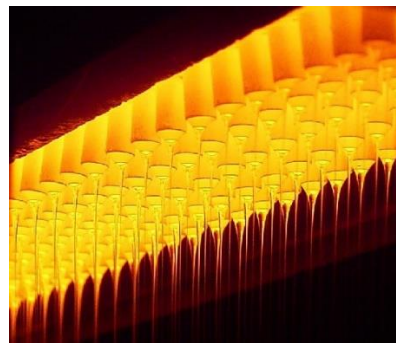


Figura 90. Proceso de formación del hilo a través de las boquillas

Las boquillas están diseñadas para tener un espesor mínimo a la salida. La formación de los filamentos se produce al fluir el vidrio a través de la boquilla a partir de la cual se forma una gota que, a medida que cae, va formando un hilo, siempre y cuando la viscosidad este en el rango adecuado para la formación de fibras[51].

Estos cabezales son el mayor gasto en la producción de fibra de vidrio. El diseño de la boquilla es muy importante ya que la correcta formación de los filamentos de vidrio depende de él. El factor más importante de la boquilla es el espesor de sus paredes en la región de salida, mientras que el número de boquillas puede oscilar en múltiplos de 200, entre 200 y 4000.

Una vez se obtienen los filamentos al salir de las boquillas, son enfriados al pasar por aletas de enfriamiento refrigeradas mediante agua, para luego ser enrollados en bobinas formando una fibra continua o tratados mediante una corriente de aire para obtener una especie de felpa.



Figuras 91 y 92. Aletas de enfriamiento

Por tanto, podemos hablar de dos tipos principales de productos de fibra de vidrio a obtener.

Por un lado, los **filamentos continuos**. En este proceso, después de extraer la fibra, se aplica un apresto que ayuda a proteger la fibra a la hora de enrollarse en una bobina. El apresto aplicado depende del uso final que tenga la fibra, y se añade generalmente sobre un porcentaje de entre el 0,5 y el 2% del peso. El bobinado se lleva a cabo en torno a 1000 m por minuto.

Por otro lado, las **fibras discontinuas**. Mediante este proceso, el vidrio es tratado con calor o vapor después de salir de la máquina de conformación. Por lo general, estas fibras forman una especie de felpa. El proceso más común es el proceso rotativo, donde el vidrio entra en un dispositivo giratorio, y debido a la fuerza centrífuga es lanzado horizontalmente. También se aplican aglutinantes y corriente de aire. A continuación, la felpa de fibra de vidrio es conformada por vacío en un filtro y más tarde entra en un horno para el curado del aglutinante.

4.5 Propiedades

Entre las propiedades de la fibra de aramida caben destacar las siguientes[51, 52]

- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica superior a la del acero. Suele ser testeada y notificada en las fibras que acaban de ser fabricadas. Las fibras más delgadas recién fabricadas son las más fuertes debido a su ductilidad. Cuanto más rayada esté la superficie, menor será la tenacidad resultante. Debido a que el vidrio tiene una estructura amorfa, sus propiedades son las mismas a lo largo y a lo ancho de la fibra. La humedad es un factor importante en la resistencia a la tracción, ya que se absorbe fácilmente empeorando las grietas microscópicas y los defectos superficiales disminuyendo la tenacidad.
- Alta adherencia fibra-matriz, gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Características eléctricas, siendo aislante hasta con espesores reducidos, aunque permeable a ondas electromagnéticas.
- Incombustibilidad por naturaleza, no propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- Estabilidad dimensional, poco sensible a variaciones de temperatura e higrometría, teniendo un bajo coeficiente de dilatación.
- Compatibilidad con las materias orgánicas. Su aptitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas.
- Imputrescibilidad, siendo insensible a los roedores e insectos.
- Débil conductividad térmica, permitiendo suprimir puentes térmicos, debido a su alta proporción de superficie respecto al peso. Por atrapamiento de aire en el interior, los bloques de fibra de vidrio tienen una conductividad térmica del orden de 0,05 W/mK.
- Excesiva flexibilidad
- Relativo bajo coste.

4.6 Coste

En relación con el coste de fabricación de productos en fibra de vidrio, al ser sus materias primas de fácil acceso y su ejecución y producción menos compleja que en la fibra de aramida o la de carbono, sus precios son destacadamente más asequibles que los anteriormente mencionados.

Esto ha permitido una rápida y extensa introducción en el mundo de la construcción con numerosas aplicaciones desde el refuerzo estructural al aislamiento. La amplia gama de formas y productos de la fibra de vidrio ayuda también a la adaptación a todo tipo de circunstancias lo que conlleva una mejor evolución y la correspondiente disminución de coste. El tipo de fibra de vidrio más extendido es el Vidrio E de uso eléctrico[53].

Además, al ser un material deformable no necesita una mano de obra especialmente calificada para su ejecución, siendo necesario unos dotes básicos de las características del producto.

Son numerosas las empresas que se encargan de la fabricación de las fibras existiendo por la tanto un mercado competente que busca la máxima calidad en sus productos con un mínimo coste de ejecución. Entre estas encontramos Vetrotex, Unitex, Microglass, Nippon electric, CEM-FIL, Advantex o Evanite[51, 54].

4.7 Clases de fibra de vidrio

Según la composición y prestaciones, distinguimos los siguientes tipos de fibras vidrio[52]:

- **Vidrio E** (Eléctrico): representa casi todo el vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos, debido a las buenas propiedades eléctricas. La primera gran aplicación industrial de fibra de vidrio E fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas.
- **Vidrio A** (Alto contenido en álcali): en comparación con el vidrio E es menos resistente y tiene un módulo más bajo. Presenta gran resistencia química.
- **Vidrio AR** (Alcali resistente): es el único tipo de vidrio capaz de combinarse con el hormigón o cemento ya que cualquier otro sería atacado por los álcalis liberados en la hidratación.
- **Vidrio C** (Químico): tiene una alta resistencia química, situándose entre el vidrio A y el E, utilizándose en las capas superficiales de estructuras anticorrosión,
- **Vidrio R ó S** (Resistencia): Tiene una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superiores a los otros tipos de vidrio empleado en estructuras de elevadas características mecánicas. Nació por la demanda de los sectores punta y responde a sus exigencias en el campo de los materiales resistentes a fatiga, temperatura y humedad.
- **Vidrio D** (Dieléctrico): contiene altas propiedades dieléctricas presentando muy débiles pérdidas eléctricas, siendo usada en la construcción de materiales electrónicos de telecomunicación.
- **Vidrio B** (Boro): de excelentes propiedades eléctricas y gran durabilidad gracias al borosilicato de calcio de bajo contenido en álcali
- **Vidrio ERC** (Eléctrico y Resistente químico): con propiedades eléctricas combinadas con resistencia química
- **Vidrio X**: con base de Li_2O por su transparencia a Rayos X

Tabla 8. Composición química de los tipos de fibra de vidrio.

Oxido	Vidrio E	Vidrio C	Vidrio S	Vidrio A	Vidrio D	Vidrio R	Vidrio ECR	Basalto
SiO_2	55,0	66,0	65,0	67,5	74,0	60,0	61,0	52,0
Al_2O_3	14,0	4,0	25,0	3,5	-	24,0	13,0	17,2
TiO_2	0,2	-	-	-	-	-	-	1,0
B_2O_3	7,0	5,0	-	1,5	22,5	-	-	-
CaO	22,0	14,0	-	6,5	-	9,0	22,0	8,6
MgO	1,0	3,0	10,0	4,5	-	6,0	3,0	5,2
Na_2O	0,5	7,5	-	13,5	1,5	0,5	-	5,0
K_2O	0,3	5,0	-	3,0	2,0	0,1	0,5	1,0
Fe_2O_3	-	-	-	-	-	-	-	5,0
Punto de ablandamiento	840°C	750°C	950°C	700°C	720°C	950°C	840°C	-

Tabla 9. Propiedades diferentes tipos de fibra de vidrio.

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (μm)	5-13	10-20	10	10
Densidad (kg/m^3)	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción (Gpa)	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente de expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{K}$)	8,6	5	5,1	5

Por otra parte, según las presentaciones industriales, podemos diferenciar entre [52]:

- Mat de hilos cortados.
 Son fieltros de hilos cortados a una longitud determinada y aglomerados entre sí mediante un ligante químico. Existen diversos tipos de mats, que se diferencian por las características del hilo de base (tipo de vidrio, diámetro de referencia, título y ensimaje) y por las del ligante (emulsión o polvo).
 Se presentan en rollos bobinados sobre un tubo soporte de cartón y varían en cuanto al *gramaje*, que se encuentra entre 100 y 900 gr/m^2 y en cuanto al *ancho*, entre 0,092 y 0,240 m.
 Sus principales características de utilización son la solubilidad en estireno, la deformabilidad, la resistencia a la tracción y la compatibilidad con las resinas
- Mat de hilos continuos.
 Consiste en un tapiz similar al de hilos cortados, pero en este caso los hilos se asocian entre ellos en la salida de un conjunto de hileras.
 La diferencia en uso entre ambos mats es debida a su nivel de deformabilidad, donde en los mats continuos son más deformables. La principal aplicación es el moldeo de piezas con formas complejas por compresión, inyección o vacío.
 Entre sus características cabe destacar el uso del vidrio E y los diámetros de las fibras superiores a las de las fibras cortadas.

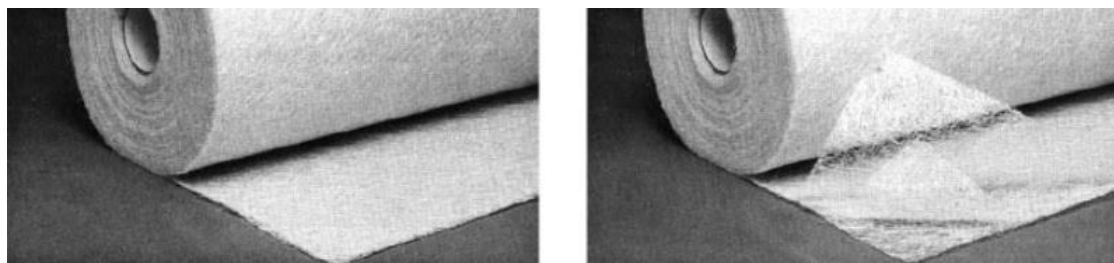


Figura 93. Comparación entre mat de hilos cortados (izquierda) y mat de hilos continuos (derecha).

- **Mat de superficie.**
Llamados también velos, son fieltros de hilos cortados ligados eficazmente y calandrados. El gramaje oscila entre 25 y 80 gr/m² siendo la presentación igual a la del resto de mats.
Las características principales son su deformabilidad, solubilidad y comportamiento frente un medio químico agresivo.

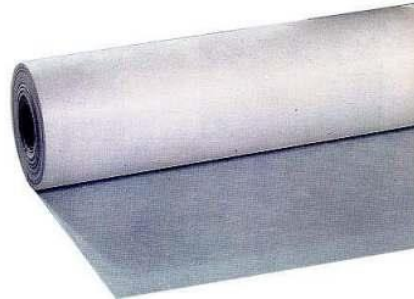


Figura 94. Mat de superficie

- **Rovings.**
Son ensamblados de filamentos sin torsión (roving directo) o hilos de vidrio (roving ensamblado) que reciben un ensimaje plástico. Existe una amplia gama de rovings distintos.
Sus características radican de la naturaleza del vidrio, el diámetro del filamento, el tipo de ensimaje o las dimensiones de las bovinas.
- **Rovings rizados (spun roving)**
En este caso los rizos creados dan refuerzo perpendicular a la dirección del roving. De esta forma su resistencia transversal mejora aumentando la resistencia a cortes interlaminares.



Figura 95. Roving liso

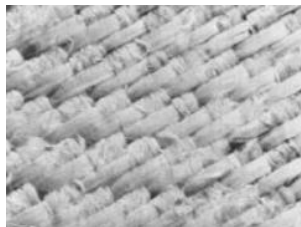


Figura 96. Detalle de spun roving y bovina de roving rizado



- **Tejidos.**
Entre ellos encontramos las telos o tafetanes (plain wave), el satén (crowfoot satin) y la sarga (twill). Pueden ser unidireccionales donde el número de hilos en una dirección es claramente superior a los hilos en dirección ortogonal, y bidireccionales, donde los hilos están colocados en capas ligadas.
Entre sus características destacan la fácil manipulación y colocación, la continuidad del refuerzo, la facilidad de impregnación y la regularidad de espesor y gramaje.
- **Hilos cortados.**
Son hilos cortados en tamaños de entre 3 y 12 mm. Entre sus aplicaciones se encuentra el refuerzo de escayolas, del cemento o el uso en el moldeo de piezas.
Entre las características cabe destacar la densidad aparente, la integridad y la longitud de corte de los hilos según la resistencia característica a obtener.



Figura 97. Tejidos



Figura 98. Fibras molidas

- Fibras molidas
En este caso las fibras son trituradas reduciéndose a una longitud de aproximadamente 0,1 a 0,02 mm, manteniéndose su diámetro. Sus aplicaciones derivan en el refuerzo de resinas termoplásticas.
- Hilos texturizados
Se aumenta el volumen de la mecha de los hilos mediante una operación mecánica obteniendo un material óptimo para tejido decorativos.
- Complejos mat-tejido
Consiste en asociaciones de mats (de superficie, de hilos cortados, de hilos continuos...) que se ligan mediante ligado químico o mecánico. Se utiliza para economizar el moldeo de productos, juntando operaciones de impregnación y desburbujeo.



Figura 99. Hilos texturizados

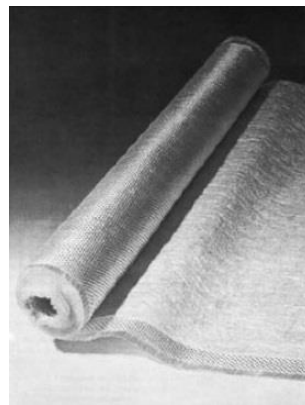


Figura 100. Complejos mat-tejido

Tabla 10. Diferentes presentaciones de la fibra de vidrio.

Mat	Superficie
	Hilos cortados
	Hilos continuos
Roving	Directo
	Ensamblado
	Spun roving
	Voluminizado
	Texturizado
Tejido	Equilibrado
	Orientado
	Unidireccional
Preformas textiles	Braiding
	Weft knitting
	Warp knitting
Hilos cortados	Refuerzo
	Termoplásticos
	Refuerzo escayola
	Usos varios
Varios	Fibra molida
	Complejos mat-tejido

4.8 Aplicaciones en la construcción

Las fibras de vidrio pueden comercializarse para la utilización en la construcción de diferentes formas entre las que encontramos[55] los paneles flexibles o semirrígidos, los paneles con láminas de acabado, los paneles sobre cartón yeso, los paneles para cubrición de conductos, los fieltros, las mallas, las coquillas, los refuerzos para morteros o los refuerzos para SATE en forma de aislamiento térmico y acústico. Haciendo hincapié en algunos de estos encontramos:

4.8.1 Paneles GRC

4.8.1.1 Composición

Los paneles GRC están formados por un compuesto basado en una matriz de microhormigón de cemento Portland, el componente mayoritario, armado con fibra de vidrio, el componente minoritario, dispersa por toda la masa, lo cual confiere al hormigón una mayor resistencia a flexión, haciendo disminuir la fragilidad del convencional. Su nombre viene de las iniciales inglesas **Glass Reinforced Concrete**[56].

Su composición se basa en cemento Portland, arena silíceo, agua descalcificada, fibra de vidrio A.R. y aditivos que pueden ser plastificantes, fluidificantes, superplastificantes, pigmentos, impermeabilizantes, hidrófugos, polímeros, elementos puzolánicos especiales...Estos aditivos se agregarán dependiendo del diseño y las propiedades del GRC en cada obra y en base a los requerimientos exigidos[57]. La cantidad de fibra de vidrio dependerá del proceso de fabricación, de la aplicación o de la resistencia a otorgar al GRC.

En cuanto a la fibra de vidrio adoptada para la realización del GRC, la **fibra de vidrio AR** (Alcali-Resistente) es la fibra idónea, por resistencia alcalina, por su alto rendimiento y prestaciones para el refuerzo del cemento. Entre las ventajas que ofrecen las fibras AR al GRC encontramos[57, 58]:

- Resistencia a químicos, la fibra utilizada es inmune a la acción de los álcalis del cemento.
- Alta resistencia a la tracción y flexión, como consecuencia de las propiedades de la fibra.
- Gran resistencia al impacto, debido a la absorción de energía por los haces de fibra.
- Impermeabilidad, aun en pequeños espesores.
- Resistencia a los agentes atmosféricos.
- Incombustibilidad, derivada de las características de sus componentes.
- Aptitud de reproducción de detalles de superficie. (Ideal para reproducir formas o imitar superficies como piedra, madera o pizarra).
- Ligereza, lo que reduce los costos de transporte, puesta en obra e instalación.
- Facilidad de moldeo en formas complejas
- Resistencia a la propagación de fisuras
- Reducción de los cuidados de mantenimiento
- Resistencia frente al vandalismo

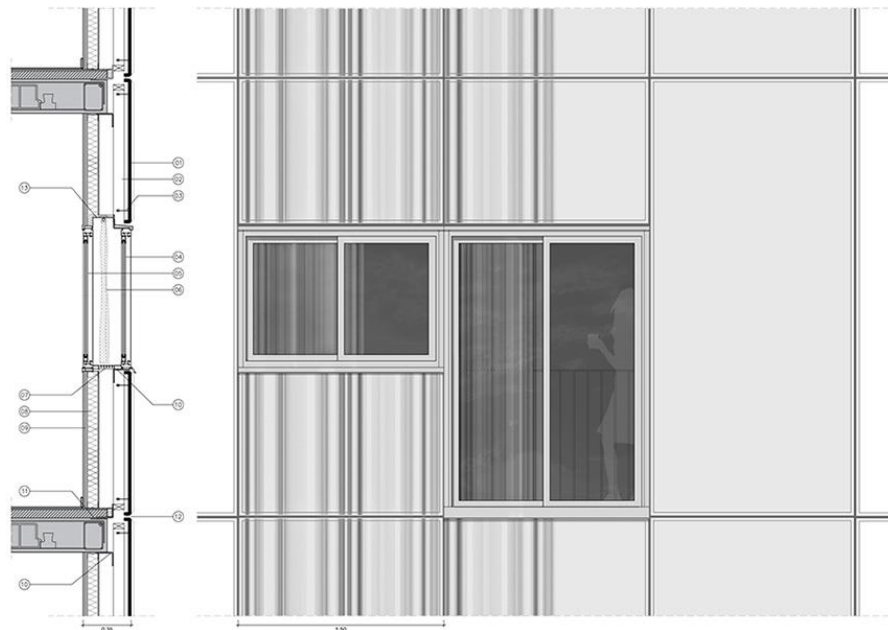


Figura 101. Detalle constructivo de la aplicación de paneles GRC en fachadas ventiladas

4.8.1.2 Fabricación

Entre los procesos de fabricación de un GRC podemos encontrar[57]:

Procesos de proyección simultánea. Se trata de un proceso de fabricación mediante el cual se obtienen piezas de GRC reforzadas de forma bidireccional en el plano. La fabricación consiste en la proyección de capas que posteriormente se van compactando entre sí hasta formar el espesor total del panel de GRC

Procesos de premezcla. Este proceso consta de dos etapas. En la primera se mezclan y amasan los componentes del mortero y se añaden las fibras de vidrio, y en la segunda se aplica la mezcla a un molde para la formación de las piezas, o se aplica la mezcla directamente a la obra in-situ, como por ejemplo en la realización de morteros monocapa, revocos o soleras. La premezcla se efectúa en hormigoneras o amasadores adaptados al tipo de mezcla deseado. Las fibras de vidrio Cem-FIL se incorporan siempre en el último lugar a la mezcla sin que se produzcan apelotonamientos o problemas de homogeneización. Debido a esta homogenización previa a la conformación de la pieza, el refuerzo de la fibra de vidrio actúa de forma tridimensional, ya que las fibras se orientan en todas las direcciones del espacio. Desarrollando los procesos principales de generación de productos GRC encontramos:

- **Proceso de Colado-Vibrado.** Es el proceso más difundido de aplicación de premezcla, dada su simplicidad, su fácil trabajabilidad y su sencilla puesta en obra. Las fases de realización son la realización de la premezcla, el colado en un molde, el vibrado, el fraguado, el desmoldeo y por último el curado. Dentro de este proceso destacan las variantes de Colado-Vibrado en molde abierto y Colado-Vibrado en molde y contramolde.
- **Proyección de la premezcla.** Se trata de una aplicación híbrida entre la proyección simultánea y la procedente del Colado Vibrado, consiguiendo piezas de GRC de resistencias medias entre ambas. Esta aplicación ha tenido gran aceptación en los últimos años.

Proceso de curado. Para la consecución de las resistencias diseñadas se aconseja disponer de un lugar en la factoría donde se pueda controlar la humedad y temperatura. Las condiciones de curado recomendadas durante 7 días para un GRC son una temperatura mayor a 15°C, una humedad entorno al 95%.

4.8.1.3 Características/Ventajas

El GRC es resultado de numerosas investigaciones en la historia de los materiales compuestos para la construcción, siendo utilizado en todo el mundo desde su invención a principios de los años 70. Su fácil aplicación, las diversas posibilidades de diseño posibles, y sobre todo sus propiedades y características mecánicas, le hacen ser una solución de gran versatilidad[56].

El hormigón convencional presenta muy buenas características ante la compresión, pero ofrece muy escasa resistencia a la tracción, por lo que resulta inadecuado para piezas que tengan que trabajar a flexión o tracción. En la búsqueda de un refuerzo que permitiera la consecución de un material compuesto con excelentes prestaciones, se desarrollaron numerosas experiencias con otras fibras de refuerzo, tanto de origen orgánico como inorgánico. De todas ellas, la mejor relación coste-propiedades mecánicas es la fibra de vidrio. Es por esto que los paneles GRC están dotados de esta fibra para resistir los esfuerzos de tracción que el hormigón no puede absorber.

Tabla 11. Características del GRC según su proceso de fabricación

	<i>Proyección (normal o automática)</i>	<i>Premezcla (colado vibrado y proyección)</i>
<i>Peso de Fibra Cem-FIL (%)</i>	5	3
<i>Módulo de rotura a flexión (MPa)</i>	20-30	10-14
<i>Límite elástico a flexión (MPa)</i>	7-11	5-8
<i>Módulo de rotura a tracción (MPa)</i>	8-11	4-7
<i>Límite elástico a tracción (MPa)</i>	5-7	4-6
<i>Resistencia a cortante (MPa)</i>	8-11	4-7
<i>Resistencia a compresión (MPa)</i>	50-80	40-60
<i>Resistencia a choque (kJ/m²)</i>	10-25	10-15
<i>Módulo de elasticidad (GPa)</i>	10-20	10-20
<i>Deformación a la rotura (%)</i>	0,6-1,2	0,1-0,2
<i>Densidad (T/m³)</i>	1,9-2,1	1,8-2,0

La mayor de las ventajas que posee el GRC es la alta resistencia mecánica, destacando la flexión y el impacto, lo cual permite crear piezas de reducido peso respecto a elementos de hormigón convencional con prestaciones superiores.

Así mismo, la ligereza adoptada repercute sobre diferentes factores de diseño e instalaciones de las piezas realizadas de este material.

Entre la lista de ventajas que se pueden adoptar gracias a la utilización del GRC, teniendo siempre en cuenta que estas modificaciones repercutirán de forma directa, en beneficio, sobre el coste de materiales, estructuras y servicios de instalación, también destacan[59]:

- Facilidad en el transporte de las piezas a obra. Por su característica de ligereza se pueden transportar de 3 a 5 veces más piezas de GRC prefabricado que de hormigón convencional.

- Reducción en las dimensiones y por tanto de material en la estructura y cimentaciones del edificio que sustentan las piezas del GRC. Este poco peso lo hace ideal para su uso en edificios de gran altura.
- Sencilla mano de obra. Debido a la ligereza y características del GRC el montaje se simplifica, reduciéndose el número total de montantes necesarios. Así mismo, los anclajes y herrajes de unión a los entramados de la estructura son mucho más ligeros.
- Aptitud a ser moldeado en formas complejas e ilimitadas posibilidades de diseños arquitectónicos, siendo especialmente útil para la renovación y restauración de inmuebles.
- Enorme diversidad de texturas y acabados de superficie realizables.
- Montaje mucho más rápido. Debido al poco peso de las piezas de GRC las grúas emplean menos tiempo de montaje y por tanto de construcción.

Todos estos factores de ahorro, estudiados en su conjunto, suponen una grandísima ventaja competitiva del GRC y lo convierten en líder frente a otros materiales alternativos[57].

4.8.1.4 Aplicaciones y acabados

En un principio, las aplicaciones de los paneles de fibra de vidrio se basaron en la realización de piezas de tamaños reducidos, pero alcanzaron su máximo desarrollo en fachadas y cerramientos. Actualmente, los usos de los paneles prefabricados GRC se extienden a la construcción de escaleras, postes para tendidos eléctricos o farolas, ambientación de parques y más aplicaciones surgidas gracias a su versatilidad y a un mayor conocimiento del material[56].

Entre las aplicaciones concretas que podemos encontrar en el mundo de la construcción se encuentran[60]:

- Paneles de fachada y cerramientos en general
- Elementos de fachada de todo tipo, incluyendo vallas y barreras
- Encofrados permanentes o reutilizables
- Sistemas modulares de viviendas
- Casetas de transformadores y de vigilancia, además de cajetines eléctricos, para enlaces telefónicos y para contadores
- Renovación y restauración de fachadas y complementos arquitectónicos
- Decoración de interiores y exteriores como pavimentos, falsos techos, esculturas, moldes, imitaciones y celosías
- Protección contra el fuego, como puertas, pantallas y conductos antifuego
- Aislamiento térmico con el uso de paneles a modo de aislante térmico
- Barreras de protección contra el ruido
- Mobiliario urbano de todo tipo

Con respecto a los acabados, las posibilidades de las placas GRC son casi ilimitadas en texturas, formas, tamaños y colores, tanto para interiorismo como para fachadas prefabricadas ventiladas[61].

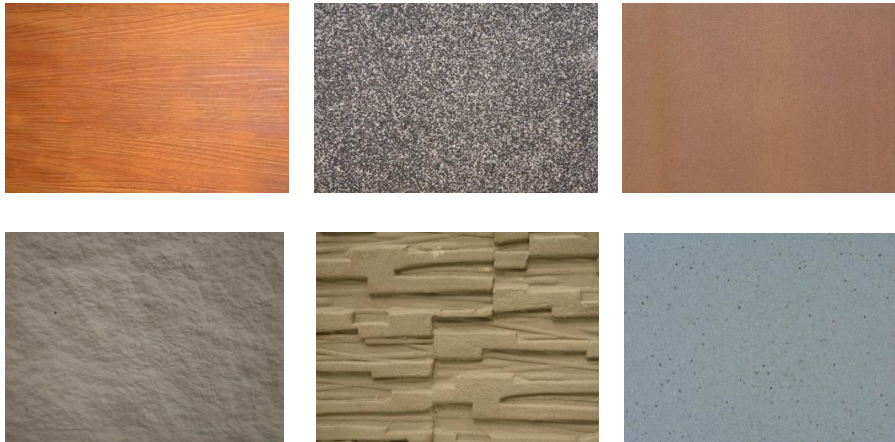


Figura 102. Distintos acabados de paneles GRC

4.8.1.5 Formatos

Los principales formatos de paneles GRC son[62]:

- **Panel Sandwich GRC**

Formados por una piel de GRC de 10mm, acompañado de núcleo interior de aislante de poliestireno expandido, lana de roca o lana de vidrio y otra piel de GRC de otros 10mm. El espesor del conjunto es variable debido al aislante, siendo los más usados de 100 o 120mm donde el peso aproximado es de 60kg/m².

Este panel se recomienda en aquellos casos en los que ambas caras del mismo son vistas o en los que hace falta un aislamiento térmico o acústico a incluir en el panel.

Se realiza mediante la colocación de aislante dentro del panel, una vez proyectada su cara moldeada, dejando espacio para colocar rigidizadores de 10 a 25mm de GRC entre cada bloque que deben ir de borde a borde para hacer que el panel trabaje como una placa maciza.

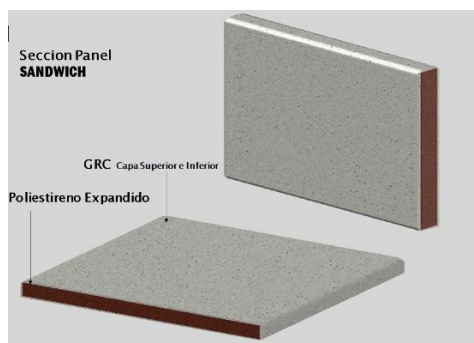


Figura 103. Panel de GRC en forma sandwich

- **Stud Frame GRC**

Formado por una capa exterior de GRC de entre 10 y 15mm de grosor rigidizada mediante un bastidor metálico siendo el espesor total de unos 120mm y de un peso de unos 45 a 60kg/m².

Ambas partes se encuentran unidas a la estructura gracias a conectores metálicos o ganchos de acero a la estructura metálica complementaria denominada bastidor tubular, con una separación entre montantes de 60 cm, la cual se ancla a la estructura principal del edificio, lo que le permite aplicar el aislamiento según las características de la obra.

De esta forma, el panel puede flotar sin temor a que las tensiones internas se sumen a las producidas por la estructura del edificio, lo cual podría producir daño en los paneles.

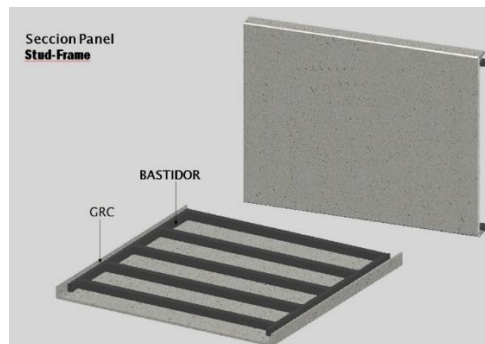


Figura 104. Panel de GRC Stud Frame

- **Panel nervado/Lámina GRC**

Se trata de un panel basado en una placa simple rigidizada mediante nervios del mismo material gracias a la colocación de un material ligero como poliestireno expandido, posteriormente cubierto por proyección de GRC. El peso se sitúa en unos 30kg/m² siendo el espesor de unos 100mm entre la piel de GRC, el EPS y la proyección de GRC sobre la EPS.

La estructura se define mediante el sistema de nervios de EPS perimetrales y centrales que se conforman con la forma y dimensiones adecuados.

Se recomienda la disposición de un tratamiento superficial de la cara vista mediante una pintura de silicatos debido a la diferente retención de humedades entra las nervaduras y la placa que puede marcar la estructura nervada de las mismas

4.8.2 Lana de vidrio

Se trata de una fibra mineral fabricada con millones de filamentos de vidrio unidos con un aglutinante que adhiere las fibras de vidrio entre sí. La masa de fibras junto al aglutinante es calentada a una temperatura de unos 200 °C para polimerizar la resina y es curada para darle resistencia y estabilidad. Finalmente se corta el producto resultante y se forman rollos o paneles a alta presión, para facilitar su transporte y almacenamiento[63].



Figura 105. Rollo de lana de vidrio

El espacio libre con aire atrapado entre las fibras aumentan la resistencia a la transmisión de ruido y sobre todo de calor. Por tanto, es un material aislante térmico y acústico sumamente eficiente y de fácil manejo con buena relación resistencia/precio.

Entre las ventajas de la lana de vidrio frente a otros aislantes encontramos que es 100% reciclable, no contamina y es un producto inerte tanto para la naturaleza, como para el ser humano. Se diferencia de otros productos aislantes, tal como los derivados del petróleo o las fibras vegetales, debido a que es incombustible, no es inflamable, no genera humo ni gases nocivos y resiste altas temperaturas, lo cual limita la propagación de las llamas retrasando el avance del fuego. Además, es más liviana y de muy baja conductividad térmica, lo que le otorga más eficacia ya que se logra mayor resistencia térmica con el mismo peso. Además, es hidrorrepelente, por lo que no es afectado por el contacto con el agua y la humedad, manteniéndose inalterable ante cualquier exposición a la lluvia o condensación[64].

Encontramos diversas aplicaciones que varían según la puesta en obra como[65]:

Aislamiento insuflado[66]. Consiste en inyectar aislamiento con fibra de vidrio a granel en las cámaras de aire de fachadas o falsos techos, distribuyéndose el material aislante de forma compacta y sin fisuras. El material, que además de aislar impide la circulación de aire caliente dentro de la vivienda, se proyecta mediante una técnica efectiva, rápida y económica sobre todo en fachadas de doble hoja o con cámara de aire. También se puede aplicar en tabiques de medianería, cajas de persiana o suelos de tarima. Entre las ventajas del aislamiento con lana de vidrio encontramos la rapidez de aplicación y puesta en obra, la limpieza y el escaso mantenimiento además de las ganancias en ahorro energético.

Aislamiento soplado [67]. Es una técnica basada en distribuir a granel el material aislante en superficies abiertas, principalmente en espacios bajo-cubierta, buhardillas o desvanes no habitables. Es un aislante muy efectivo ya que por las cubiertas se producen importantes pérdidas energéticas. Al igual que el aislamiento insuflado apenas requiere mantenimiento, es de rápida aplicación y se amortiza mediante el ahorro energético. Otra ventaja es que a diferencia del aislamiento insuflado pueden aplicarse espesores mayores.

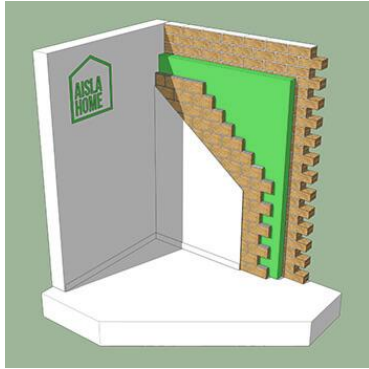


Figura 106. Aislamiento insuflado

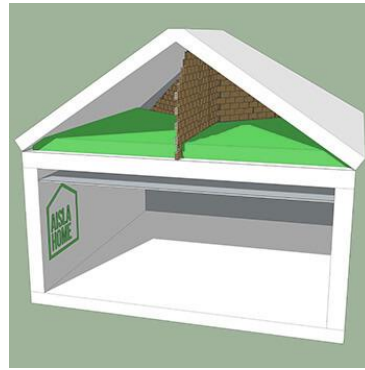


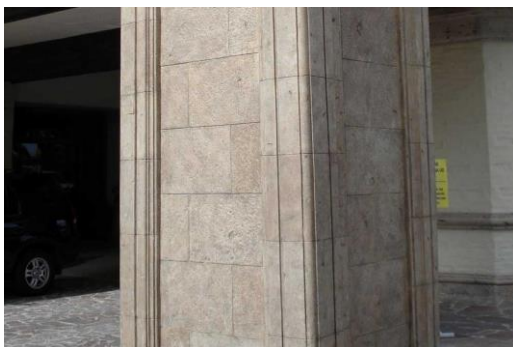
Figura 107. Aislamiento soplado

4.8.3 Recubrimientos

4.8.3.1 Recubrimiento de muros y pilares

Los muros elaborados con fibra de vidrio se usan para sustituir el trabajo detallado de superficies por molduras que, unidas entre ellas, consiguen un recubrimiento del muro original. Las molduras se fabrican e instalan sobre el ladrillo o el hormigón con un acabado desde madera hasta roca, donde apenas es distinguible la unión entre las piezas de fibra de vidrio. Esto acelera el proceso de producción y la calidad estética del muro consiguiendo excelentes resultados [68, 69].

Entre las ventajas encontramos la calidad de la réplica del material original, la facilidad y rapidez de fabricación, así como la sencilla instalación. Por tanto, cuando se requieran materiales de precios más elevados, la fibra de vidrio es una buena opción para abaratar costes. Los recubrimientos son duraderos, fáciles de limpiar y mantener y muy resistentes, soportando golpes y rayos de sol.

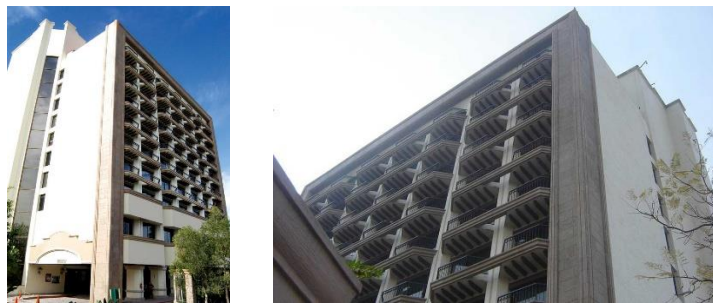


Figuras 108 y 109. Pilar y muro con acabado de fibra de vidrio

4.8.3.2 Recubrimientos de fachadas

La fibra de vidrio también es un material excelente para el revestimiento exterior de fachadas de edificios o viviendas, debido a su resistencia a rayos UVA. Los productos se montan normalmente sobre bastidores sujetos al cerramiento de fábrica garantizando la perfecta alineación de las diferentes piezas del material que conforma la fachada. Con esto se consigue además un rápido acceso para mantenimientos o reparaciones[70].

Las piezas pueden replicar casi cualquier material como la madera, la cerámica, la roca o el metal sin modificar el tiempo de montaje consiguiendo una rápida ejecución de obra, creando una perfecta réplica del material a sustituir. Además no se astilla, no reproduce polilla, hongo, moho, ni se oxida, no es conductor de electricidad y resulta ligera y segura en su manejo y traslado, lo cual la convierte en un material muy conveniente para el revestimiento exterior de fachadas.



Figuras 110 y 111. Revestimiento de fachadas con placas con fibra de vidrio

4.8.3.3 Recubrimientos de vigas, barandillas, pérgolas o celosías

El recubrimiento de vigas con fibra de vidrio se realiza a través de laminado de plástico reforzado con fibras donde se puede cubrir toda una gama de medidas con diferentes acabados como madera, hormigón, cerámica o metal. Las posibilidades en formas, colores y detalles son casi infinitas. Pueden ser instaladas de distintas formas, desde el atornillado hasta el pegado por pegamento epoxídico dependiendo de las necesidades del proyecto[71].

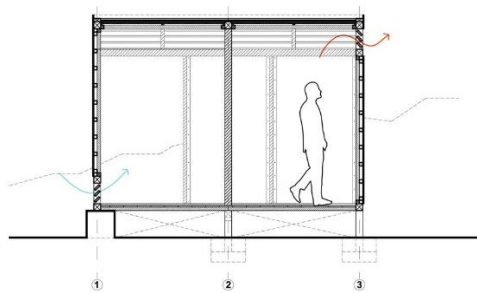
De la misma forma, la fibra de vidrio también puede ser usada en el recubrimiento de barandillas, celosías o pérgolas para dar la apariencia de materiales más complejos de fabricar y por tanto de mayor coste. Las ventajas siguen siendo las mismas, capacidad de adaptación en formas y acabados, diferentes colores y texturas, disminución del tiempo y coste de ejecución y escaso mantenimiento gracias a su bajo deterioro debido a sus excelentes propiedades de resistencia a agentes externos[72].

4.9 Ejemplos de construcciones con fibra de vidrio

4.9.1 Módulo 10x10 (Monterrey, México)

A través del proyecto Módulo 10x10, los arquitectos Vivex y S-AR han investigado las posibilidades de la reutilización de materiales para responder a la falta de vivienda en familias de escasos recursos o a situaciones de emergencia en México. Este proyecto genera un sistema modular flexible a partir del reciclaje de paneles de vidrio ya usados en otras obras[73].

El módulo se levanta del suelo mediante pilotes que sostienen la construcción, que se eleva para obtener una corriente de aire por su parte inferior, consiguiendo un mejor aislamiento además de una aplicación efectiva de la ventilación natural.



Figuras 112 y 113. Módulo 10x10 con cerramiento de fibra de vidrio reciclada

El proyecto intenta desarrollar un prototipo de sistema constructivo alternativo explorando materiales y métodos de construcción económicos basados en la reutilización de paneles de fibra de vidrio transformándolos en un sistema modular flexible, para una configuración espacial a la necesidad de cada usuario, pensando en cubrir las necesidades de aislamiento frente a temperaturas extremas, desarrollándose técnicas de diseño para generar y optimizar el confort ambiental del espacio interior.



Figuras 114 y 115. Proceso constructivo del Módulo 10x10 con cerramiento de fibra de vidrio reciclada

En el proyecto, además del cerramiento de fibra de vidrio reciclada, se diseñó una cubierta ventilada por medio de huecos creados entre la estructura de madera, el falso techo y la cubierta de lámina metálica. En el interior se usaron diversos materiales de revestimiento realizándose el hormigonado con neumáticos usados.

4.9.2 Rascacielos de REX Architecture (Kuala Lumpur, Malasia)

Los arquitectos de REX Architecture han diseñado un rascacielos en Kuala Lumpur con una capa retráctil textil, fabricada de teflón PTFE reforzada con fibra de vidrio, que permite proteger el interior durante las horas de mayor radiación solar y abrirse a las vistas cuando la intensidad baja[74].

Se trata de un proyecto donde se presta mucha importancia a la cantidad de luz solar que pasa a través de las ventanas del edificio, ya que se busca la forma de controlar la entrada de luz sin a la vez perder visibilidad del paisaje urbano. Esta innovadora piel plegable reforzada con fibra de vidrio, para maximizar la eficiencia energética en respuesta a la exposición solar de 4 lados, tiene un mecanismo que permite regular la opacidad hasta un 85%, manteniendo una cierta transparencia para permitir el ingreso de luz a las oficinas, sin perder los puntos de vista difusos. La torre, destinado a oficinas y tiendas, se basa en una planta cuadrada simple y tiene 380 metros de altura.



Figuras 116 y 117. Vistas exteriores del rascacielos con la piel retráctil reforzada con fibra de vidrio

El velo es de color plata para rechazar el calor en el exterior y negro con la finalidad de mejorar la vista del paisaje urbano en el interior. Por otra parte, la piel se encuentra dividida en 4,2 millones de tejas para permitir la circulación de aire y facilitar el movimiento de retracción, que se produce gracias a un sistema de cables que se extienden a lo largo de tres secciones diferentes del edificio.



Figuras 118 y 119. Piel exterior reforzada con fibra de vidrio en posición abierta

4.9.3 Serpentine Gallery 2014 (Londres, Reino Unido)

Serpentine Gallery es una galería de arte situada en Hyde Park de Londres donde cada año se diseña un pabellón con diferentes características y materiales. El pabellón Serpentine del año 2014 fue diseñado por el arquitecto chileno Smiljan Radić junto con la empresa AECOM, y en él se utilizó fibra de vidrio para lograr el efecto ligero y futurista requerido en el diseño.



Figuras 120 y 121. Estructura translúcida de fibra de vidrio apoyada sobre rocas

La intención del arquitecto fue crear un orbe de fibra de vidrio semi-translúcido encaramado sobre piedras de cantera, un juego frágil entre el material, la textura y la luz. Radić quiso plasmar el papel maché que usa a menudo en su trabajo y gracias a la fibra de vidrio consiguió un resultado donde la estructura se sentía delgada, quebradiza y frágil.

El proceso por el cual se llevó a cabo la construcción del pabellón fue idéntico a la forma en que se forma una estructura de papel maché, se necesitaba de un molde para crear la forma, por lo cual se creó un negativo de poliestireno a partir de grandes bloques de dos por cuatro metros, y se colocaron las tiras de fibra de vidrio alrededor. Además, se buscó que la fibra de vidrio transmitiera la suficiente luz para brillar, por lo que se hicieron muchas pruebas para obtener el nivel correcto de transferencia de luz y color.



Figuras 122 y 123. Estructura translúcida de fibra de vidrio iluminada por la luz del sol o por luces artificiales

El resultado fue un pabellón ligero, de formas complejas, donde la luz juega entre el interior y el exterior gracias a la materialidad dada por la fibra de vidrio que lo forma.

5. Análisis comparativo entre materiales

5.1 Comparativa de fibras de carbono, aramida y vidrio

Una vez estudiadas las características, propiedades y aplicaciones básicas en la construcción de las tres fibras, cabe realizar una comparación entre ellas con el fin de averiguar cuál es la mejor solución dependiendo del tipo de proyecto a realizar. La elección de un tipo de fibra para una aplicación determinada depende de los requerimientos exigidos para la misma, existiendo una amplia gama de productos distintos como hilos, tejidos o fibras cortas para adaptarse a las exigencias dadas.

A continuación, desarrollaremos una serie de comparaciones entre parámetros básicos de las tres fibras con el fin de sacar una conclusión firme sobre cual fibra es la más adecuada para cada situación[76].

En cuanto a la **densidad**:

- La fibra de carbono tiene una densidad de $1,6\text{g/cm}^3$.
- En la fibra de aramida, la densidad varía entre $1,42$ y $1,48\text{g/cm}^3$ dependiendo del tipo de fibra empleado.
- La fibra de vidrio, y más concretamente la fibra E, tiene una densidad de $2,58\text{g/cm}^3$.

Las tres fibras sitúan su densidad muy por debajo de materiales como el acero, que posee una densidad de $7,85\text{g/cm}^3$. Podemos observar que cuando se busca un material ligero es mejor optar por fibras de aramida y carbono, aunque la diferencia con la fibra de vidrio no es excesiva.

De la misma forma, el **módulo de Young**:

- En la fibra de carbono el valor del módulo es muy amplio, desde 170GPa en fibras LM hasta más de 965GPa en fibras UHM
- La fibra de aramida posee valores de entre 70GPa en fibras de bajo módulo y 170GPa en fibras de alto módulo.
- En la fibra de vidrio E es de 72GPa .

En este caso, el módulo de Young del acero es muy competitivo frente al de las fibras sintéticas, situándose en 210GPa , por encima de la fibra de vidrio y la aramida. Sin duda el material con mayor módulo de Young es el carbono.

Por otro lado, la **resistencia a la tracción**:

- La fibra de carbono cuenta con unos $1,3\text{GPa}$ en fibras de bajo módulo y $5,5\text{GPa}$ en fibras de ultra alto módulo.
- La fibra de aramida dispone de entre 3GPa en fibras de bajo módulo y $3,5\text{GPa}$ en fibras de alto módulo.
- En la fibra de vidrio se sitúa entre $3,45\text{GPa}$ en el caso de Vidrio E y $4,69\text{GPa}$ en el de Vidrio S-2.

En este caso, ninguna fibra destaca en exceso sobre las otras, pudiendo optar por la fibra de carbono en caso de buscar elementos con una resistencia muy elevada. Por otra parte, en comparación con el acero, las tres fibras tienen comportamientos excelentes frente a la tracción.

De la misma mano, la **resistencia a compresión**:

- La fibra de carbono tiene una alta resistencia a compresión que supera siempre 1,3GPa debido a su distribución molecular.
- La fibra de aramida tiene una resistencia a compresión casi nula.
- La fibra de vidrio dependiendo del tipo puede variar entre 1,08GPa para Vidrio E y 1,6GPa para vidrio S-2.

Se llega a la conclusión de que para casi cualquier circunstancia la mejor fibra a usar es la de carbono, siendo la única que planta cara a la resistencia a compresión lograda por el acero.

Sin embargo, la **resistencia al impacto**:

- La fibra de carbono apenas resiste deformaciones por impactos bruscos lo que provoca la rotura de la pieza.
- En cambio, la fibra de aramida es un excelente material para la absorción de impactos por su alta capacidad de absorción de energía.
- La fibra de vidrio es un material aceptable quizá mermado por su alta flexibilidad.

Por tanto, la fibra adecuada para resistir impactos es la de aramida, capaz de absorber y disipar la energía aplicada gracias a su alto módulo de elasticidad y baja elongación a la rotura, además de su excelente tenacidad lo que significa baja fragilidad.

Por otra parte, la **resistencia al fuego**:

- Es un problema para la fibra de carbono en comparación con la aramida y el vidrio, debido a que al calentarse, un filamento de carbono se hace más grueso y corto, lo que provoca inestabilidades y a la larga una menor resistencia al fuego.
- La fibra de aramida, en cambio, es resistente al fuego, no se derrite ni se inflama y carboniza solo a temperaturas muy altas. Es muy usada para la no propagación y extinción de incendios.
- La fibra de vidrio es incombustible por naturaleza, no propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.

En este caso, tanto la fibra de vidrio como la aramida son aptas para resistir el paso de las llamas.

Además, el **aislamiento térmico**:

- Es también un problema para la fibra de carbono, apenas ofreciendo resistencia al paso del calor y las llamas.
- La fibra de aramida es un muy buen aislante térmico, siendo recomendable trabajar con este tipo de fibra en el rango térmico de estabilidad.
- La fibra de vidrio tampoco es conductor térmico, permitiendo suprimir puentes térmicos y ser un muy buen aislante térmico, al igual que sucede con la aramida.

Algunos de los productos más usados en la construcción con la fibra de vidrio vienen dados por sus propiedades aislantes, como es el caso de la lana de vidrio o el panel GRC, por lo que esta fibra es la mejor opción entre las tres.

Refiriéndonos a la **dilatación térmica**, los tres materiales tienen comportamientos excelentes, apenas deformándose por la aplicación de calor hasta elevadas temperaturas gracias a la baja conductividad térmica, siendo resistentes a variaciones de temperatura.

Pensando en el **aislamiento eléctrico**:

- La fibra de carbono sigue sufriendo frente a todo tipo de aislamientos.
- En cambio, la fibra de aramida es un buen aislante eléctrico debido a su baja conductividad eléctrica.
- La fibra de vidrio también es un muy adecuado material para el aislamiento eléctrico, siendo aislante hasta con espesores reducidos, aunque permeable a ondas electromagnéticas.

Al igual que con el aislamiento térmico, parte del desarrollo de la fibra de vidrio en la construcción ha sido precisamente por sus características eléctricas, siendo la clase de fibra de vidrio más extendida la de tipo E (eléctrica)

Por último, respecto al **coste**:

- La fibra de carbono, por su elaborado y difícil proceso de producción, es sin duda el compuesto analizado más caro de aplicar en la construcción.
- La fibra de aramida tiene un precio más competitivo siendo usada para mejorar propiedades de materiales ya bien implantados como el hormigón.
- La fibra de vidrio, gracias a su relativamente sencilla obtención y fabricación, actualmente es la fibra más asequible del mercado.

Tabla 12. Comparación de fibras según su comportamiento ante diversos parámetros. Un valor A indica un comportamiento bueno de la fibra, un valor B indica un comportamiento aceptable y un valor C indica un comportamiento mediocre o malo[76]

Propiedad	Vidrio	Carbono	Aramida
Densidad(g/cm ³)	C (2,58)	B (1,6)	A (1,42-1,48)
Módulo elástico(GPa)	C(72)	A(170-965)	B(70-170)
Resistencia a tracción(GPa)	B(3,45-4,69)	A(1,38-5,52)	B(3-3,5)
Resistencia a compresión(GPa)	B(1,08-1,6)	A(>1,3)	C(≈0)
Resistencia a impacto	B	C	A
Resistencia al fuego	A	C	A
Aislamiento térmico	A	C	A
Dilatación térmica	A	A	A
Aislamiento eléctrico	A	C	B
Coste	A	C	C

6. Conclusiones

Tras estudiar con atención las fibras de carbono, aramida y vidrio, podemos sacar unas conclusiones sobre ellas a fin de valorar su puesta en acción en el presente y futuro en el sector de la construcción.

Por un lado, las fibras de carbono presentan una combinación de características que pueden funcionar de manera valiosa para determinadas aplicaciones. Sobresalen por tener unas excelentes propiedades mecánicas además de por tener una baja densidad y la libertad de crear y adaptarse a cualquier forma. En general, superan las características ofrecidas por los aceros, pero su mayor problema se da en el elevado coste de fabricación en comparación con estos, lo cual supone una enorme desventaja a la hora de decidir por cual decantarse. Sin embargo, ahorrando en piezas de enlace y mecanización, reduciendo los gastos de mantenimiento y aumentando la vida útil, las ventajas pueden valorizarse.

Por otro lado, la fibra de aramida constituye un excelente material cuyas propiedades a destacar, entre otras, son la absorción de esfuerzos a tracción, con la posibilidad de introducirlas en una matriz de un material débil frente a estos esfuerzos como el hormigón. Además, su estabilidad dimensional frente a acciones externas como el fuego y las llamas, los agentes químicos o su resistencia al impacto hacen de este un material muy versátil para su uso en la construcción.

Por último, la fibra de vidrio es sin duda el material más adaptado a día de hoy gracias a su relativa facilidad de fabricación y a sus excelentes características a un bajo precio. Su resistencia mecánica, junto con las magníficas características térmicas y eléctricas hacen de este material una muy buena opción para aislar tanto de la intemperie como en la propia construcción. Además, es un material estable e incombustible por lo que sus aplicaciones pueden ser aún más diversas.

En cómputos globales, el uso de la fibra de carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio, debido a su bajo peso y resistencia elevada en comparación con el acero y el hormigón, comienza a afianzarse. Gracias a esto es posible construir de forma más rápida, disminuyendo el riesgo y reduciendo además las cargas muertas del conjunto.

Sin embargo, uno de los problemas que surgen y limitan el uso de estas fibras es el todavía elevado coste, siendo necesario subrayar que mediante un diseño adecuado y tras evaluar las ventajas económicas posteriores que conlleva su utilización, como la excelente durabilidad y el mantenimiento prácticamente nulo, el uso de estos materiales resulta rentable a largo plazo. Cabe resaltar, pues, que la problemática principal en el entorno de la construcción respecto a este tipo de materiales es el desconocimiento de sus prestaciones, así como el conservadurismo tradicional del sector.

Para concluir, y haciendo énfasis en las aplicaciones posibles, concretamos que:

En revestimientos exteriores como aplacados o fachadas ventiladas con paneles, una buena opción es la fibra de vidrio, debido a las exigencias de resistencia frente agentes externos, facilidad de manejo por su poco peso, buen aislamiento térmico y acústico, y bajo coste, lo cual puede resultar crucial por las grandes superficies a cubrir en determinadas construcciones. Los paneles GRC son un buen ejemplo del potencial de esta fibra.

En revestimientos interiores también puede contarse con la fibra de vidrio, gracias a su fácil maleabilidad para crear formas complejas a un bajo coste, debido en parte a la gran cantidad de productos derivados como los hilos cortados o las fibras molidas.

Respecto al material más apto para rehabilitaciones y reparaciones estructurales, la fibra de carbono es excelente. Su punto fuerte es la innecesidad de realizar cambios en la estructura, siendo suficiente implementar la fibra en los puntos críticos de la misma, por lo que no hay que demoler ninguna fracción de la estructura existente. Además, es un material con altas resistencias mecánicas con lo que es suficiente con disponer láminas muy finas que no incomoden las realizaciones posteriores. Los parches en vigas o pilares son un buen ejemplo de aplicaciones del carbono como refuerzo.

Centrándonos en la estructura, no hay ninguna fibra que destaque sobre las otras. Las tres tienen excelentes comportamientos mecánicos por lo que las diferencias surgen de las distintas adaptaciones con el resto de materiales usados. Si se desea crear estructuras con matrices como el hormigón, la fibra de aramida es una buena opción, ya que a diferencia del acero, son inertes al fuego y absorben de manera más eficiente las tracciones. Si en cambio se desea diseñar estructuras de tamaños moderados como pequeños pabellones, la fibra de carbono es el material idóneo, ya que gracias a su peso liviano, sería posible transportar los mismos sin apenas coste de obra, subsanando así el problema del precio en esta fibra.

En elementos expuestos a impactos, el material con las mejores propiedades de absorción de energía, gracias a su módulo de elasticidad y excelente tenacidad, es la fibra de aramida. A diferencia de la fibra de carbono, que tiene una alta fragilidad, la fibra de aramida es capaz de adaptar su forma para absorber los impactos, haciéndola el mejor material para espacios con alto tránsito de personas o en planta baja.

Respecto a elementos de aislamiento térmico y acústico como mantas, cuyas exigencias derivan de aumentar el confort en las estancias aislando el frío o el calor del exterior, la fibra de vidrio es la mejor opción. Existen productos como la lana de vidrio, con una amplia utilización en el mercado gracias a sus excelentes resultados con pocos espesores.

En refuerzos constructivos en localizaciones con peligro de sismo, donde se exige una alta resistencia a la tracción y compresión debido al efecto columpio que se produce sobre los edificios, el material más adecuado es el carbono.

Por último, como elementos decorativos vistos, las tres fibras presentan diversos usos y aplicaciones. Con sus debidos tratamientos pueden realizar distintos papeles en superficies o fachadas, donde son necesarias características de resistencia a los rayos UVA o agentes químicos. Mientras que las fibras de vidrio y aramida hacen un excelente trabajo a nivel textil, pudiendo ser usadas para elementos de cobertura del sol, la fibra de carbono es usada en muebles de diseño.

En conclusión, aunque cabe destacar la importancia que comienzan a adquirir estos materiales en todos los sectores de la industria de la construcción, todo indica que aún queda mucho camino por recorrer.

7. Referencias

7.1 Bibliografía documental

Introducción

- [1] https://prezi.com/dzg2mxn4fom_/evolucion-de-los-materiales-de-construccion/
- [2] http://iespoetaclaudio.centros.educa.jcyl.es/sitio/upload/mat_construccion_b11.pdf
- [3] <https://es.wikipedia.org/wiki/Pol%C3%ADmero>
- [4] <https://www.textoscientificos.com/polimeros/sinteticos>
- [5] https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_sint%C3%A9tica

Fibra de carbono

- [6] <http://carbosystem.com/fibra-de-carbono-2/>
- [7] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>
- [8] <http://www.fibradecarbono.es/articulos/que-es-fibra-carbono/>
- [9] https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_carbono
- [10] <https://es.slideshare.net/gonzalomartinezbarre/fibras-de-carbono>
- [11] <http://www.madehow.com/Volume-4/Carbon-Fiber.html>
- [12] <http://abcmodular.com/fibra-de-carbono-construccion-modular>
- [13] <https://www.autonocion.com/un-proyecto-de-id-en-alemania-podria-reducir-en-un-90-el-coste-de-la-fibra-de-carbono/>
- [14] <http://www.fibradecarbono.es/articulos/tipos-de-fibra-de-carbono/>
- [15] <http://obrasinsignia.com/blog/fibra-de-carbono-construccion/>
- [16] <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/352/400>
- [17] <http://www.nomadite.com/book.pdf>
- [18] <https://laeski.com/blog/el-interiorismo-la-arquitectura-y-la-fibra-de-carbono/>
- [19] <https://laeski.com/blog/carbon-core-puerta-interior-fibra-carbono/>

Fibra de carbono – Ejemplos

- [20] <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/785552/kengo-kuma-presenta-obra-con-el-refuerzo-antisismico-mas-ligero-del-mundo>
- [21] <http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>
- [22] <http://solucionista.es/pabellon-icd-itke/>
- [23] <https://www.itke.uni-stuttgart.de/page/3>
- [24] <https://fromthemasstothemass.wordpress.com/2013/03/05/un-pabellon-fabricado-por-un-robot/>
- [25] <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/arkitektbron-un-puente-construido-con-fibra-de-carbono>

Fibra de aramida

- [26] <https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>
- [27] <https://www.termiser.com/kevlar-que-es-propiedades/>
- [28] <https://es.wikipedia.org/wiki/Kevlar>
- [29] <http://www.madrimasd.org/blogs/patentesymarcas/2015/el-kevlar-una-invencion-que-ha-salvado-muchas-vidas/>
- [30] <http://www.dupont.es/productos-y-servicios/fibras-tejidos-y-telas-no-tejidas/fibers/brands/kevlar.html>
- [31] <http://quimorg5.blogspot.com/2008/11/kevlar-estructura-y-propiedades.html>
- [32] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- [33] <https://spanish.alibaba.com/g/aramid-fiber-price.html>
- [34] <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17156-Carbono-y-Aramida-del-concepto-a-la-produccion.html>
- [35] <http://www.preoc.es/download/ADS/D40GF005/Doc.%20hormigon%20fibras%20aramida.pdf>
- [36] <http://www.dupont.cl/productos-y-servicios/prendas-de-proteccion/prendas-accesorios-protectores-termicos/articulos/tecnologias-resistentes-a-llamas.html>
- [37] <http://www.sireggeotech.it/es/products/barras-y-estribos-arapree%C2%AE-para-el-refuerzo-de-armaduras-permanentes>
- [38] <http://www.sireggeotech.it/es/products/tejidos-de-fibra-de-aramida-arapree%C2%AE>
- [39] <http://www.goodfellow.com/S/Poliaramida'-Nido-de-Abeja.html>

Fibra de aramida - Ejemplos

- [40] https://es.wikipedia.org/wiki/Estadio_Ol%C3%ADmpico_de_Montreal#Problemas
- [41] <https://www.sbp.de/en/project/roof-olympic-stadium-montreal/>
- [42] http://www.ameriquefrancaise.org/en/article-558/The_Montreal_Olympic_Stadium_Complex.html
- [43] <http://nmnoticias.ca/2017/11/09/estadio-olimpico-montreal-nuevo-techo/>
- [44] <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- [45] <https://www.treehugger.com/green-architecture/kevlar-coated-disaster-resistant-house-10design.html>
- [46] <https://www.stylepark.com/en/news/of-nurbs-and-border-crossers>
- [47] <http://www.studioseed.net/blog/software-blog/parametric-generative-design-blog/rhinoceros/villa-nurbs/>
- [48] <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/villa-nurbs/>
- [49] <https://www.zdnet.com/article/betting-on-kevlar-tomorrows-wonder-material/>

Fibra de vidrio

- [50] https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_vidrio
- [51] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>
- [52] <https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>
- [53] <http://www.plaremesa.net/curiosidades-la-fibra-vidrio-precio-origen-usos/>
- [54] <https://tienda.resineco.com/fibrasvidrio>
- [55] https://www.construmatica.com/construpedia/Fibra_de_Vidrio
- [56] <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/>
- [57] http://www.hormigonespecial.com/~documentacion/P.Comino-%20JC.Romero_El_GRC.pdf
- [58] <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/cualidades/>
- [59] <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/ventajas/>
- [60] <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/aplicaciones/>
- [61] <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/acabados-texturas/>
- [62] <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/formatos-dimensiones/>
- [63] https://es.wikipedia.org/wiki/Lana_de_vidrio
- [64] <https://agroredes.com.ar/lana-de-vidrio-ventajas-y-usos/>
- [65] <https://aislahome.es/aislamiento-fibra-vidrio/>
- [66] <https://aislahome.es/aislamiento-insuflado/>
- [67] <https://aislahome.es/aislamiento-soplado/>
- [68] <http://www.afibra.com/es/productos/interiores/muros-fibra-vidrio.html>
- [69] <http://www.afibra.com/es/productos/interiores/columnas-fibra-vidrio.html>
- [70] <http://www.afibra.com/es/productos/construccion/fachadas-fibra-vidrio.html>
- [71] <http://www.afibra.com/es/productos/construccion/vigas-fibra-vidrio.html>
- [72] <http://www.afibra.com/es/productos/construccion/barandales-fibra-vidrio.html>

Fibra de vidrio - Ejemplos

- [73] <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/627149/proyecto-modulo-10x10-reutiliza-la-fibra-de-vidrio-para-levantar-prototipo-de-vivienda-sostenible>
- [74] <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-324308/capa-textil-retractil-envuelve-el-nuevo-rascacielos-de-rex-architecture>
- [75] <https://www.metropolismag.com/architecture/cultural-architecture/how-aecom-engineered-2014-serpentine-pavilion/>

Análisis comparativo (Resistencia fibras)

- [76] <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17156-Carbono-y-Aramida-del-concepto-a-la-produccion.html>

7.2 Bibliografía gráfica

Figura 1. Elaboración propia

Figura 2. <https://www.motoryracing.com/pruebas/noticias/la-fibra-de-carbono-y-su-uso-en-el-mundo-automotriz/>

Figura 3. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>

Figura 4. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>

Figura 5. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>

Figura 6. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>

Figura 7. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html>

Figura 8. Elaboración propia con AutoCAD tomando como referencia (<https://es.slideshare.net/gonzalomartinezbarre/fibras-de-carbono>)

Figura 9. Elaboración propia con AutoCAD tomando como referencia (<http://ruizaero.com/manufacturing>)

Figura 10. Elaboración propia con AutoCAD tomando como referencia (http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/organizing_your_composite_workshop.html)

Figura 11. <http://www.arquitecturadecasas.info/modelos-de-casas-modulares/>

Figura 12. <http://empresason.com/not/1093/moduacero-empresa-aragonesa-pionera-en-la-construccion-de-viviendas-sostenibles-en-acero/>

Figura 13. <https://suviviendamodular.com/construccion-con-hormigon/>

Figura 14. <http://abcm modular.com/fibra-de-carbono-construccion-modular>

Figura 15. <https://www.ajoma.es/servicios/%C3%A1rea-construcci%C3%B3n/refuerzos-y-reparaciones/>

Figura 16. <http://www.ideasciviles.com/servicios.html>

Figura 17. http://carm.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Hormigon_armado/EHZ_Refuerzos_con_laminados_y_hoja/EHZ110_Refuerzo_a_cortante_de_vigas_con_h_0_0_0_0_0_0_0_0_0_0_0_0_0_0_0_0.html

Figura 18. http://www.mexico.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Concreto_reforzado/Refuerzos_y_anclajes/EHZ110_Refuerzo_a_cortante_de_vigas_con_h.html

Figura 19. <http://www.solidmallorca.com/construccion/>

Figura 20. <http://helpconstructivos.com/fibra-de-carbono-para-el-refuerzo-estructural/>

Figura 21. <http://www.tecnoav.cl/8-reparacion-y-refuerzo-estructuras-con-fibra-de-carbono/>

Figura 22. http://www.tectonica-online.com/productos/699/fibra_carbono_estructural_refuerzo_sikadur_sikawrap/

- Figura 23. http://www.generadordeprecios.info/rehabilitacion/Estructuras/Hormigon_armado/EHZ_Refuerzos_con_laminados_y_hoja/EHZ022_Zunchado_de_pilar_de_hormigon_armad.html
- Figura 24. <https://www.construnario.com/notiweb/25014/mapei-pionera-en-espana-en-la-obtencion-del-dit-para-los-sistemas-de-refuerzo-de-estructuras-de-hormigon-armado-con-fibra-de-carbono#>
- Figura 25. <http://abcm modular.com/fibra-de-carbono-construccion-modular>
- Figura 26. <https://www.cca.qc.ca/en/events/34445/carbon-tower>
- Figura 27. <https://laeski.com/productos-fibra-de-carbono/>
- Figura 28. <https://laeski.com/productos-fibra-de-carbono/>
- Figura 29. <http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>
- Figura 30. <http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>
- Figura 31. <http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>
- Figura 32. <http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>
- Figura 33. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/785552/kengo-kuma-presenta-obra-con-el-refuerzo-antisismico-mas-ligero-del-mundo>
- Figura 34. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/785552/kengo-kuma-presenta-obra-con-el-refuerzo-antisismico-mas-ligero-del-mundo>
- Figura 35. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/785552/kengo-kuma-presenta-obra-con-el-refuerzo-antisismico-mas-ligero-del-mundo>
- Figura 36. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/785552/kengo-kuma-presenta-obra-con-el-refuerzo-antisismico-mas-ligero-del-mundo>
- Figura 37. Elaboración propia con AutoCAD tomando como referencia (<http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>)
- Figura 38. Elaboración propia con AutoCAD tomando como referencia (<http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>)
- Figura 39. Elaboración propia con AutoCAD tomando como referencia (<http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>)
- Figura 40. https://fromthemesstothemass.files.wordpress.com/2013/03/img_8_1362435780_f37c7eb209949b75470928d88cc52395.jpg
- Figura 41. https://fromthemesstothemass.files.wordpress.com/2013/03/img_10_1362435780_6bb134696620822b8cf0ca6d77c8f892.jpg
- Figura 42. <http://solucionista.es/wp-content/uploads/ICD-+-ITKE-10.jpg>
- Figura 43. <http://solucionista.es/wp-content/uploads/ICD-+-ITKE-5.jpg>
- Figura 44. <http://solucionista.es/wp-content/uploads/ICD-+-ITKE-4.jpg>
- Figura 45. <http://solucionista.es/wp-content/uploads/ICD-+-ITKE-12.jpg>
- Figura 46. <https://erikandersson.format.com/2297725-architect-bridge#0>

- Figura 47. <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/arkitektbron-un-puente-construido-con-fibra-de-carbono>
- Figura 48. <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/arkitektbron-un-puente-construido-con-fibra-de-carbono>
- Figura 49. <https://www.castrocompositesshop.com/en/fibras-de-refuerzo/1227-tejido-de-kevlarcarbono-sarga-22-de-215-gm2.html>
- Figura 50. https://es.wikipedia.org/wiki/Kevlar#/media/File:Kevlar_chemical_structure_H-bonds.png
- Figura 51. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- Figura 52. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- Figura 53. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- Figura 54. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- Figura 55. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- Figura 56. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- Figura 57. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- Figura 58. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.html>
- Figura 59. <http://www.junksupply.com/product/aramid-or-kevlar-roving/>
- Figura 60. <http://www.aircraftspruce.com/catalog/cmpages/kevlar49.php>
- Figura 61. <https://spanish.alibaba.com/img/fibras-cortas-de-aramida-300001359324.html>
- Figura 62. <http://www.sireggeotech.it/es/products/barras-y-estribos-arapree%C2%AE-para-el-refuerzo-de-armaduras-permanentes>
- Figura 63. <https://www.nidodeabeja.com/es/productos/nido-de-abeja/nido-de-abeja-nomex-comercial>
- Figura 64. <http://www.rcinet.ca/es/2017/11/10/continua-la-saga-del-techo-del-estadio-olimpico-de-montreal/>
- Figura 65. http://www.ameriquefrancaise.org/en/article-558/The_Montreal_Olympic_Stadium_Complex.html
- Figura 66. <https://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=755404&page=13>
- Figura 67. <https://www.sbp.de/en/project/roof-olympic-stadium-montreal/>
- Figura 68. <https://www.sbp.de/en/project/roof-olympic-stadium-montreal/>
- Figura 69. <https://www.sbp.de/en/project/roof-olympic-stadium-montreal/>
- Figura 70. <https://sabr.org/bioproj/park/477659>
- Figura 71. <https://fotospublicas.com/selecao-feminina-sub-20-treina-estadio-olimpico-de-montreal/>
- Figura 73. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- Figura 74. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- Figura 75. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>

- Figura 76. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- Figura 77. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- Figura 78. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- Figura 79. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- Figura 80. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- Figura 81. <https://www.dezeen.com/2008/03/25/eiffel-dna-by-serero-architects/>
- Figura 82. <https://www.treehugger.com/green-architecture/kevlar-coated-disaster-resistant-house-10design.html>
- Figura 83. <https://www.treehugger.com/green-architecture/kevlar-coated-disaster-resistant-house-10design.html>
- Figura 84. https://www.castrocompositesshop.com/en/fibras-de-refuerzo/1178-mat-de-hilos-cortados-de-fibra-de-vidrio-e-y-100-gm2.html#/147-peso-1_m2
- Figura 85. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e2/Glasfaser_Roving.jpg
- Figura 86. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>
- Figura 87. Elaboración propia con AutoCAD tomando como referencia (<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>)
- Figura 88. Elaboración propia con AutoCAD tomando como referencia (<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>)
- Figura 89. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>
- Figura 90. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>
- Figura 91. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>
- Figura 92. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>
- Figura 93. <https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>
- Figura 94. <http://www.prochima.it/mat-di-superficie.html>
- Figura 95. <http://www.nauticexpo.es/prod/vetrotex-ocv-reinforcements/product-27891-254463.html>
- Figura 96. <https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>
- Figura 97. <https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>
- Figura 98. http://www2.owenscorning.com/worldwide/mexico/pdfs/FIBRA_MOLIDA.pdf
- Figura 99. <https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>
- Figura 100. <https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>
- Figura 101. <http://www.safont-tria.com/es/portfolio/2015-panells-grc-esp/>

- Figura 102. <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/acabados-texturas/>
- Figura 103. <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/formatos-dimensiones/>
- Figura 104. <https://www.tecnyconta.es/paneles-grc/formatos-dimensiones/>
- Figura 105. <https://www.empresasrjr.cl/importadora/producto/lana-de-vidrio-papel-1-cara-80-mm/>
- Figura 106. <https://aislahome.es/aislamiento-insuflado/>
- Figura 107. <https://aislahome.es/aislamiento-soplado/>
- Figura 108. <http://www.afibra.com/es/productos/interiores/columnas-fibra-vidrio.html>
- Figura 109. <http://www.afibra.com/es/productos/interiores/muros-fibra-vidrio.html>
- Figura 110. <http://www.afibra.com/es/productos/construccion/fachadas-fibra-vidrio.html>
- Figura 111. <http://www.afibra.com/es/productos/construccion/fachadas-fibra-vidrio.html>
- Figura 112. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/627149/proyecto-modulo-10x10-reutiliza-la-fibra-de-vidrio-para-levantar-prototipo-de-vivienda-sostenible/5409d16dc07a80b90600000d>
- Figura 113. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/627149/proyecto-modulo-10x10-reutiliza-la-fibra-de-vidrio-para-levantar-prototipo-de-vivienda-sostenible/5409d139c07a808f0a00000b>
- Figura 114. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/627149/proyecto-modulo-10x10-reutiliza-la-fibra-de-vidrio-para-levantar-prototipo-de-vivienda-sostenible/5409d189c07a808f0a00000d>
- Figura 115. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/627149/proyecto-modulo-10x10-reutiliza-la-fibra-de-vidrio-para-levantar-prototipo-de-vivienda-sostenible/5409d199c07a808f0a00000e>
- Figura 116. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-324308/capa-textil-retractil-envuelve-el-nuevo-rascacielos-de-rex-architecture/52ce1a0de8e44e30c8000086>
- Figura 117. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-324308/capa-textil-retractil-envuelve-el-nuevo-rascacielos-de-rex-architecture/52ce1a31e8e44e30c8000088>
- Figura 118. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-324308/capa-textil-retractil-envuelve-el-nuevo-rascacielos-de-rex-architecture/52cd734ae8e44ee34f000182>
- Figura 119. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-324308/capa-textil-retractil-envuelve-el-nuevo-rascacielos-de-rex-architecture/52cd7346e8e44e1bc8000185>
- Figura 120. <http://www.serpentinegalleries.org/exhibitions-events/serpentine-galleries-pavilion-2014-smiljan-radic>
- Figura 121. <https://www.telegraph.co.uk/culture/art/architecture/10922887/Serpentine-Gallery-2014-Kensington-Gardens-review-captivating.html>
- Figura 122. <https://www.archdaily.com.br/br/624099/serpentine-pavilion-de-smiljan-radic-imagens-de-huffon-mais-crow/53c5ae4ac07a80c64a000054>
- Figura 123. <https://www.arquine.com/pabellon-serpentine-2014/>

Tabla 1. Elaboración propia tomando como referencia

[\(<https://es.slideshare.net/gonzalomartinezbarre/fibras-de-carbono>\)](https://es.slideshare.net/gonzalomartinezbarre/fibras-de-carbono)

Tabla 2. Elaboración propia tomando como referencia

[\(<http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/>\)](http://www.komatsuseiren.co.jp/cabkoma/en/)

Tabla 3. Elaboración propia tomando como referencia

[\(<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17156-Carbono-y-Aramida-del-concepto-a-la-produccion.html>\)](http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17156-Carbono-y-Aramida-del-concepto-a-la-produccion.html)

Tabla 4. Elaboración propia tomando como referencia la Tabla 1.1.5 del libro

[\(<https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>\)](https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete)

Tabla 5. Elaboración propia tomando como referencia

[\(\[http://www.preoc.es/download/ADS/D40GF005/Doc.%20hormigon%20fibras%20aramida.pdf?cookie_check=1\]\(http://www.preoc.es/download/ADS/D40GF005/Doc.%20hormigon%20fibras%20aramida.pdf?cookie_check=1\)\)](http://www.preoc.es/download/ADS/D40GF005/Doc.%20hormigon%20fibras%20aramida.pdf?cookie_check=1)

Tabla 6. Elaboración propia tomando como referencia

[\(\[http://www.preoc.es/download/ADS/D40GF005/Doc.%20hormigon%20fibras%20aramida.pdf?cookie_check=1\]\(http://www.preoc.es/download/ADS/D40GF005/Doc.%20hormigon%20fibras%20aramida.pdf?cookie_check=1\)\)](http://www.preoc.es/download/ADS/D40GF005/Doc.%20hormigon%20fibras%20aramida.pdf?cookie_check=1)

Tabla 7. Elaboración propia tomando como referencia

[\(<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.htm>\)](http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/kevlar-y-nomex.htm)

Tabla 8. Elaboración propia tomando como referencia

[\(<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html>\)](http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/12/fibra-de-vidrio.html)

Tabla 9. Elaboración propia tomando como referencia

[\(<https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>\)](https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete)

Tabla 10. Elaboración propia tomando como referencia

[\(<https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete>\)](https://es.scribd.com/document/362430268/Materiales-Compuestos-Tomo-I-Antonio-Miravete)

Tabla 11. Elaboración propia tomando como referencia

[\(\[http://www.hormigonespecial.com/~documentacion/P.Comino-%20JC.Romero_El_GRC.pdf\]\(http://www.hormigonespecial.com/~documentacion/P.Comino-%20JC.Romero_El_GRC.pdf\)\)](http://www.hormigonespecial.com/~documentacion/P.Comino-%20JC.Romero_El_GRC.pdf)

Tabla 12. <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/17156-Carbono-y-Aramida-del-concepto-a-la-produccion.html>