



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE ARQUITECTURA



LA FIBRA DE CARBONO COMO REFUERZO ESTRUCTURAL
EN COLUMNAS DE CONCRETO ARMADO.

*CASO DE ESTUDIO COLUMNAS DE LA LÍNEA 12 DEL METRO DE LA CIUDAD DE
MÉXICO*

TESINA

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

ARQUITECTA

PRESENTA

MONTSERRAT VANESSA GUERRERO MORALES

SINODALES

ARQ. CARMEN HUESCA RODRIGUEZ

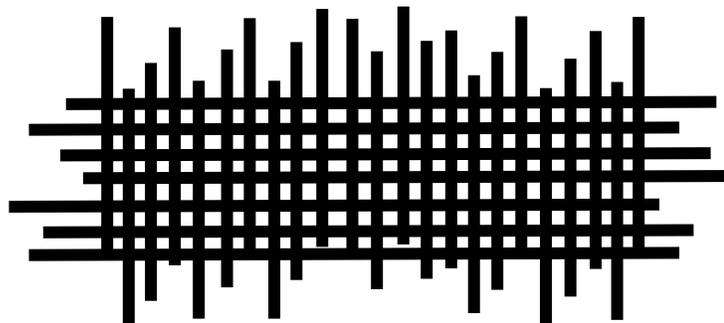
ARQ. JOSÉ LUIS MACOTELA MACÍAS

ARQ. ENRIQUE GANDARA CABADA

CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO

Noviembre 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE GENERAL

Objetivos	7
Hipótesis	8
Introducción	9
1 Antecedentes y evolución de la fibra de carbono	13
1.1 Historia general del carbono	13
1.2 Proceso de transformación del carbono en fibra de carbono	14
1.3 Definición de fibra de carbono	17
1.4 Evolución del uso de la fibra de carbono	17
2 La fibra de carbono en la construcción	20
2.1 Características de la fibra de carbono	20
2.2 Ventajas y desventajas de su uso	25
2.3 Uso de la fibra de carbono en las edificaciones	25
2.4 El uso de la fibra de carbono en columnas dañadas por sismos	26
3 De los materiales como estructura	27
3.1 Definición de materiales	27
3.2 Materiales en la construcción	28
3.3 Sistemas estructurales	29

3.4 Materiales que trabajan a compresión, flexión y tensión	32
3.5 Acero y concreto como material estructural	33
4 Columnas de concreto de la Línea 12 del metro. Caso estudio	36
4.1 Limpieza / preparación	37
4.2 Aplicación resina	44
4.3 Aplicación fibra de carbono	45
4.4 Aplicación resina	46
4.5 Aplicación arena	47
4.6 Recubrimiento contras rayos V	49
Reflexiones	51
Glosario	52
Fuentes de consulta	53

Dedicatoria

La presente tesina, si bien ha requerido de esfuerzo y mucha dedicación, no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas que me acompañaron en el recorrido laborioso de este trabajo y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación, primero y antes que todo, dar gracias a mi familia, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haberme acompañado durante todo el periodo de estudio, a mi tutora Arq. Carmen Huesca, al Arq. José Luis Macotela y al Arq. Enrique Gándara por su amplia experiencia y conocimientos me orientaron al correcto desarrollo y culminación con éxito este trabajo para la obtención de la Licenciatura en Arquitectura, a través de ellos a la Universidad Nacional Autónoma de México. Sin su apoyo no estaría en este punto. Gracias, gracias, gracias.

Agradecimientos

Padre,

No encuentro ninguna forma para agradecerte todo lo que has hecho por mí, por ese apoyo incondicional, por siempre estar al pendiente de mí y de mi educación, por impulsarme a salir adelante, eres un ejemplo de que cuando se quiere algo se tiene que luchar para obtenerlo y esta vez estoy cumpliendo uno de mis más grandes sueños. Siempre serás una de las personas con las que querré compartir mis logros. Te amo infinito.

Madre,

Eres un pilar esencial para mí y para la casa, gracias por todas las lecciones que me has dado a lo largo de toda mi vida, por estar al pendiente de mí y de mi escuela, por ser mi apoyo incondicional y por motivarme siempre a salir adelante. Las palabras no me alcanzan para poder agradecerte, espero te puedas sentir orgullosa de mí. Te amo infinito.

Karen,

Hermanita, eres mi más grande inspiración, cuando era chiquita siempre quise ser como tú y ahora aquí estoy a punto de terminar mi carrera como tú lo hiciste, muchas gracias por siempre escucharme y apoyarme en los momentos más frustrantes de mi vida, por ser ese sostén cuando no creían en mí. Recuerda que siempre serás mi compañera de vida favorita. Te amo infinito.

Abe,

Gracias prima por impulsarme a dar el primer acercamiento a realizar este documento, gracias por apoyarme y echarme porras para culminar esta etapa de mi vida. Gracias por acompañarme en todo este camino.

Arq. Carmen Huesca,

Gracias arquitecta por orientarme en todo el proceso para realizar mi tesina, por compartirme todos sus conocimientos, por la confianza, el apoyo y el tiempo dedicado para poder culminar una etapa más de mi vida.

Arq. Macotela y Gándara,

Gracias por la confianza, el tiempo y apoyo que me brindaron para la realización de esta tesina, por compartir conmigo sus conocimientos y por motivarme a culminar esta importante etapa para mí.



"En realidad, nunca hablamos de la forma en la oficina. Hablamos de la construcción, se puede hablar de la ciencia, y hablar de los sentimientos [...] Desde el principio, los materiales están ahí, justo al lado de la mesa [...] cuando ponemos los materiales juntos, comienza una reacción [...] esto es acerca de los materiales, se trata de crear una atmósfera, y esto es sobre la creación de la arquitectura".

Peter Zumthor

Objetivo General

Demostrar el costo beneficio del uso de la fibra de carbono para reforzar columnas de concreto armado en edificaciones dañadas por efecto sismo.

Objetivos Particulares

- 1.- Identificar la evolución y antecedentes del uso de la fibra de carbono para comprender las características de la misma.
- 2.- Establecer el panorama general de materiales comúnmente utilizados para el reforzamiento de columnas.
- 3.- Mencionar la reciente utilización del uso de la fibra de carbono a fin de entender las ventajas y desventajas de su elección como refuerzo en columnas de concreto armado en edificaciones afectadas por sismo.
- 4.- Analizar el costo beneficio del uso de la fibra de carbono como material de refuerzo en columnas para vislumbrar su factibilidad.

Hipótesis

“La reciente implementación de la fibra de carbono como refuerzo estructural en columnas de edificaciones afectadas estructuralmente, ha mostrado la viabilidad para mejorar el comportamiento del refuerzo de las columnas dañadas o recuperar y mejorar su resistencia”

Introducción

La presente investigación se refiere al tema de la fibra de carbono, que se puede definir como una fibra sintética la cual está constituido por cierto número de filamentos que están compuestos principalmente por carbono, el cual se obtiene a partir del Poliacrilonitrilo (PAN).

Las características principales de este material es que posee una alta ligereza en cuanto a su peso, tiene una resistencia superior a la del acero y es un material maleable.

Para analizar la fibra de carbono es necesario mencionar que este material se creó para dar mejores soluciones al espacio a intervenir y eficientizar el material, dándonos apertura a esta investigación para entender mejor la fibra de carbono.

La investigación de este material se realizó por el interés de conocer desde como es que se puede obtener la fibra de carbono desde el carbono y cómo esto puede beneficiar o afectar el tema económico. Esto nos permite hacer una relación/comparativa con otros materiales dentro del mercado.

Por otra parte, comparar el costo con relación a los beneficios que tiene la fibra de carbono y a su vez con los materiales mas comerciales que podemos encontrar para las obras.

Profundizar la indagación desde la perspectiva de la tecnología de materiales, fue un interés académico. Así mismo nos interesamos por aportar información verídica y que se ha llevado a cabo.

En el ámbito profesional, como Arquitecto, el interés comenzó al realizar practicas en el laboratorio de materiales, realizando diferentes muestras para posteriormente someterlas a compresión para así observar su comportamiento.

Analizar los materiales, en específico la fibra de carbono, en su aplicación a las problemáticas encontradas en diferentes estructuras y/o elementos.

Diferencias con base en las características y propiedades del material, las variables aplicaciones dentro y fuera del ámbito constructivo.

Contrastar las ventajas y desventajas de su uso con otros materiales comúnmente utilizados en el mercado.

En el capítulo 1, se realiza una introducción al carbono, donde explicamos los inicios del carbono, como se fue transformando hasta el material del cual estamos hablando, la fibra de carbono y su evolución.

En el capítulo 2, nos adentraremos al tema de la fibra de carbono, dando a conocer sus características, algunas ventajas y desventajas del uso de este, y finalmente del uso como tal en las edificaciones y la aplicación en columnas de concreto armado que han sufrido esfuerzos generados por sismos.

En el capítulo 3, analizaremos a los materiales como estructura para las edificaciones, así como algunos sistemas estructurales y como trabajan dichos materiales cuando están sometidos a diferentes esfuerzos dando pauta a investigar al acero y concreto, como los materiales más comerciales.

En el capítulo 4, Caso estudio, donde hablaremos, explicaremos y mostraremos todos los procedimientos que se deben realizar para la correcta aplicación de la fibra de carbono en un caso real.

Como introducción se hizo una línea de tiempo de los principales materiales que han sido utilizados y evolucionados con el paso del tiempo, dentro de ello se encontraron mezclas entre estos materiales mejorando así las resistencias y las características que tienen por separado.

Piedra caliza: está compuesta de carbonato de calcio (CaCO_3), se utilizaba principalmente en el periodo Neolítico, su función era principalmente estructural



10,000 a.C.

10,000 a.C. – Tierra: es una mezcla de arcilla, limos y arena, y en ocasiones, también puede contener pequeñas cantidades de grava y piedras, del periodo Neolítico, se utilizó como agregado con



9,000 a.C. –
5,000 a.C.

Yeso: Sulfato de calcio hemihidratado, se encuentra en polvo, lo utilizaban en el periodo Neolítico como unión de piezas de mampostería, sellar juntas en muros, revestimiento de



Arcilla: está compuesta por agregados de silicato de aluminio hidratado, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio, se implementó en el periodo



6,000 a.C.

6,000 a.C.

Arena: son rocas disgregadas, se utilizaba en el periodo Neolítico como relleno de huecos en muros y techumbres, posteriormente se utilizó para las cimentaciones y como componente para el cemento.



Cemento: es un conglomerante hidráulico de piedra el cual lo utilizaban para la construcción de pisos, muros, losas, etc., en el periodo Neolítico.

Concreto: es una mezcla de cemento con áridos (grava, gravilla y arena) más agua, el cual se utilizó como estructura para edificaciones, ya que resiste esfuerzos de



1,300 a.C.



1,200 a.C.

Hierro: Es un metal maleable, tenaz, de color gris plateado y presenta propiedades magnéticas; es ferromagnético a temperatura ambiente.



Acero: lo encontramos como una aleación de hierro con carbono, el cual contiene una mayor resistencia y funciona



S. XVIII

S. XIX

Concreto armado: unión de concreto y acero, formando un material con una mayor resistencia, utilizado para cimentaciones, muros, losas,



1 Antecedentes y evolución de la fibra de carbono

1.1 Historia general de Carbono

El Carbono tiene como símbolo C, su número atómico es 6, su temperatura de fusión es muy elevada ($T_m=3,550^{\circ}\text{C}$), así como su temperatura de sublimación ($T_s=3,800^{\circ}\text{C}$). (Palacios, s.f.).

Este material cuenta con algunas propiedades físicas dentro de las formas alotrópicas: grafito, diamante, fulereno y grafeno. Sus propiedades esenciales varían dramáticamente, contrastando en apariencia desde la negrura del grafito hasta la transparencia, claridad y brillo intenso del diamante puro. En cuanto a la dureza, el grafito es blando y se esparce bien sobre superficies como el papel (lápices). El diamante, por otro lado, es el material con la dureza más alta conocida, con la clasificación más alta en 10 en la escala de Mohs, la escala estándar de dureza del material.

Propiedades	Grafito	Diamante	Fulereno	Grafeno
Estructura	Hexagonal laminar	Cristales cúbicos	Esferas Hexagono-pentágono	monocapa atómica
Color	Negro	Transparente (sin color)	Negro	Negro
Dureza	Blando	Muy duro	Suave	-----
Conductividad Eléctrica	Conductor	No conductor	Conductor	Conductor
Densidad (g/m^3)	2.25	3.52	1.72	Alta
Lubricidad	Sí	----	----	Sí

Tabla 1. Propiedades físicas comparativas de las cuatro formas alotrópicas del carbono.

El carbono es el elemento químico básico para la existencia de la vida ya que forma parte de los bloques de construcción o elementos estructurales que componen los órganos y cuerpos de animales y plantas. Un gran número de otras sustancias carbonosas componen el petróleo y sus derivados, que son los combustibles básicos que mueven nuestra sociedad y son materia prima para la fabricación de plásticos, fibras, productos farmacéuticos, entre otros.

El carbono está presente en muchos procesos tecnológicos que han cambiado nuestro mundo. La industria metalúrgica mezcla hierro con carbono y otros metales para formar aleaciones que mejoran drásticamente la dureza, la formabilidad, la ductilidad y la resistencia mecánica del acero.

En cualquier estado en el que esté presente el carbono, es inodoro, insípido, tiene baja volatilidad, es insoluble en todos los solventes orgánicos comunes y es químicamente muy inerte a temperatura ambiente. Una característica muy importante del carbono es la formación de enlaces químicos muy estables consigo mismo, dando como resultado la formación de cadenas simples o ramificadas compuestas por muchos átomos de carbono (hasta 60). También se une fácilmente con hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno. Por lo tanto, el carbono es uno de los elementos importantes que forman la base de la química orgánica, que también se denomina "la química de los compuestos de carbono". (Carbono, s.f.).

Gracias a las diferentes propiedades que tiene el carbono, podemos obtener por diferentes enlaces ciertos materiales los cuales llevan un proceso de transformación, como es el caso de la fibra de carbono, del cual a continuación explicaremos.

1.2 Proceso de transformación del carbono en fibra de carbono

A continuación, se presentará el proceso de transformación del carbono en los filamentos que conforman la fibra de carbono, teniendo como resultado características y propiedades diferentes para el mejor uso en los diferentes campos.

La fibra de carbono es un polímero de una cierta forma de grafito. El grafito es una forma de carbono puro. En el grafito los átomos de carbono están dispuestos en grandes láminas de anillos simétricos hexagonales.

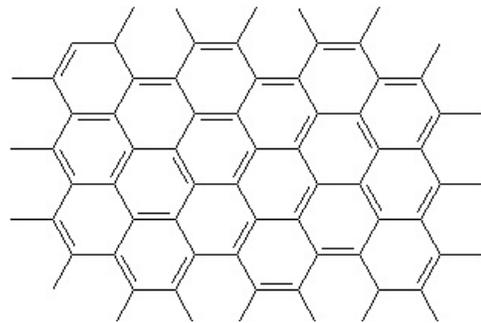


Imagen 2. Lámina de grafito

Este material se fabrica a partir de otro polímero, llamado poliacrilonitrilo, a través de un complicado proceso de calentamiento. Cuando se calienta el poliacrilonitrilo, el calor hace que las unidades repetitivas formen anillos.

Al aumentar el calor, los átomos de carbono se deshacen de sus hidrógenos y los anillos se vuelven aromáticos. Este polímero constituye una serie de anillos fusionados. (Mariano, 2011).

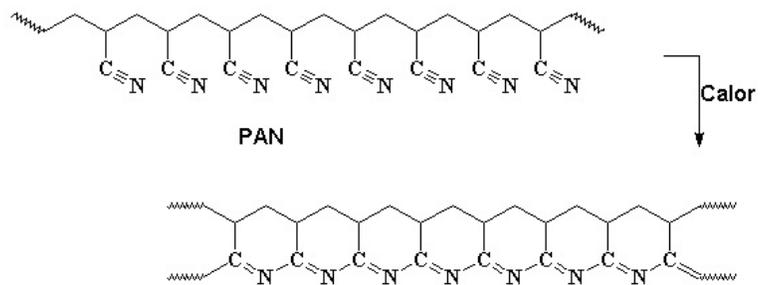
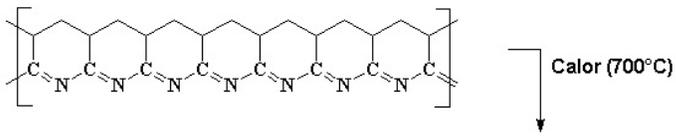
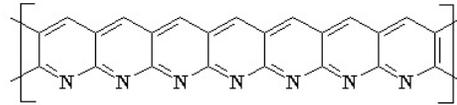


Imagen 2. Fusión de anillos



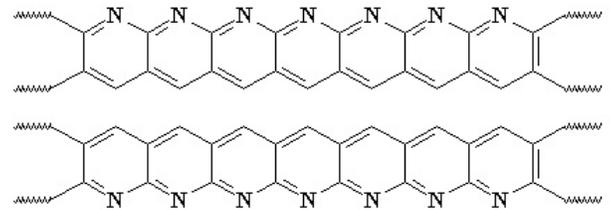
Luego se incrementa la temperatura a unos 400-600°C. De este modo, las cadenas adyacentes se unen



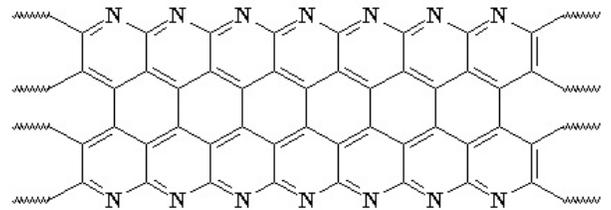
+ H₂ gas

Imagen 3 Unión de cadenas por incremento de temperatura

Este calentamiento libera hidrógeno y da un polímero de anillos fusionados en forma de cinta. Incrementando aún más la temperatura de 600 hasta 1300°C, nuevas cintas se unirán para formar cintas más anchas: (Mariano, 2011).

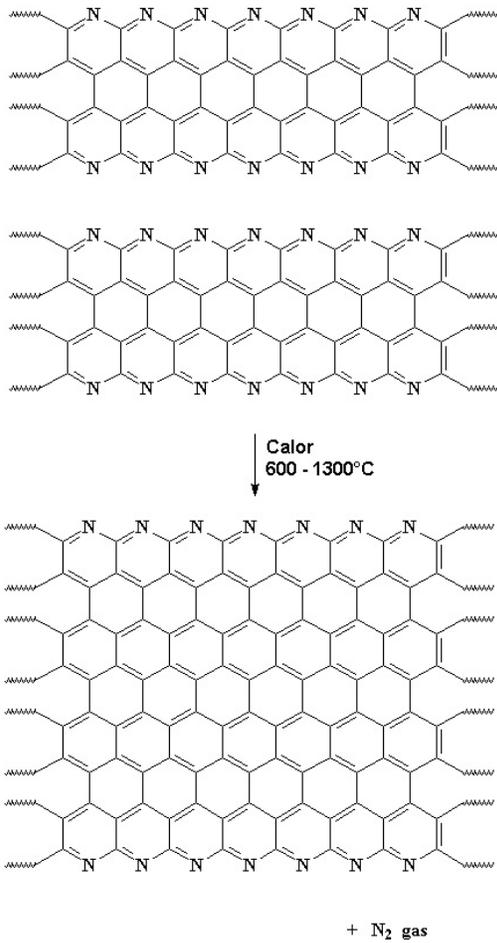


Calor
400 - 600°C



+ H₂ gas

Imagen 4 Formación de cintas más anchas



De este modo se libera nitrógeno. Como se puede observar, el polímero que es obtenido tiene átomos de nitrógeno en los extremos, por lo que, estas cintas pueden unirse para formar cintas aún más anchas. A medida que ocurre esto, se libera más nitrógeno. Terminado el proceso, las cintas son extremadamente anchas y la mayor parte del nitrógeno se liberó, quedando una estructura que es casi carbono puro en su forma de grafito. (Mariano, 2011).

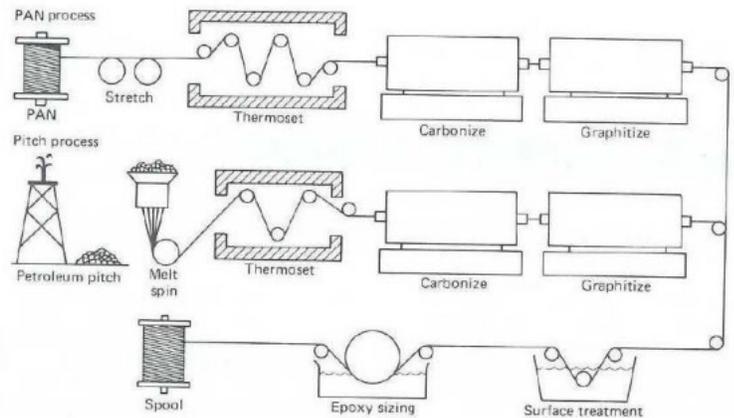


Imagen 5 Se continúan uniendo las cintas hasta llegar a tener una estructura de casi carbono puro

Imagen 6 Proceso de fabricación de la fibra de Carbono a partir del PAN (Poliacrilonitrilo).

Como vemos, el carbono es el elemento en el que está fundamentada la vida. Las propiedades químicas del carbono, le permiten a este elemento unirse con una gran cantidad de átomos distintos para formar moléculas enormes y complejas. De hecho, la química del carbono, como vemos, es tan variada que es capaz de formar más compuestos químicos que el resto de los elementos de la tabla periódica juntos. Por eso no es de extrañar que exista la química orgánica, también llamada química del carbono, es una rama esta ciencia, que se dedica a estudiar solo los compuestos que forma el carbono. En nuestro caso estudiaremos la fibra de carbono, de la cual ya hablaremos en el capítulo 3.

1.3 Definición de fibra de carbono

La fibra de carbono es un tejido muy resistente mecánicamente, duradero, flexible. Se comercializa en forma de telas o fieltros. Sus principales características son su resistencia, su aspecto elegante y su peso liviano.

Este polímero es obtenido a partir de otro polímero llamado poliacrilonitrilo (PAN), el cual consiste en hebras muy finas de carbono (tan delgadas como el cabello humano) que son trenzadas, las cuales se tuercen y se agrupan continuamente para la formación de un hilo de varias hebras, se coloca sobre un molde y encima se le vierte una resina o plástico para pegar estos hilos tejidos y darles forma a sus diversas aplicaciones. (Pedro, 2015).

Es importante recalcar que gracias a las propiedades con las que cuenta la fibra de carbono, fue teniendo diferentes usos y aplicaciones. Con la tecnología avanzando fue evolucionando el uso del material en diferentes ámbitos, por ejemplo, en el deporte, automotriz, aeronáutica, construcción, entre otras.

1.4 Evolución del uso de la fibra de carbono

El origen de la fibra de carbono (polímeros de grafito, que son una forma pura de carbono en la que los átomos de carbono están dispuestos en láminas de anillos hexagonales) se remonta a finales del siglo XIX, cuando Thomas Edison carbonizó fibras de bambú para utilizarlas como filamento en las bombillas eléctricas incandescentes, moldeándolas y sometiénolas a altas temperaturas. El uso de estos primeros filamentos resultaba muy poco eficiente, a diferencia del de los de tungsteno, material que pronto reemplazó al carbono en las bombillas eléctricas. (OMPI, s.f.).

Aunque Union Carbide Corporation (UCC) logró desarrollar una forma de carbono moldeado, viable comercialmente, se consideraba que el carbono en forma de fibra era prácticamente imposible de fabricar, debido a la inextricable dificultad que entrañaba la fabricación de fibras de grafito. Todo esto cambió en 1956, cuando UCC comenzó a utilizar el rayón (un polímero obtenido artificialmente a base de celulosa, como el algodón, que se utilizó ampliamente para la confección de prendas de vestir) como insumo básico para la fibra de carbono. En 1958, el Dr. Roger Bacon, científico en la empresa UCC, descubrió los “triquitos de grafito” en los filamentos de rayón que podían transformarse en fibras de carbono, lo que marcó el comienzo del moderno proceso de fabricación de la fibra de carbono.

Mientras avanzaba la investigación sobre el rayón en los EE.UU., del otro lado del Océano Pacífico había investigadores que estaban estableciendo su propia industria de fibra de

carbón basada en el poliacrilonitrilo (PAN), un polímero sintético que se usaba poco en aplicaciones comerciales. En vista de que el PAN era un polímero difícil de utilizar, los investigadores estadounidenses lo abandonaron después de varias infructuosas tentativas de crear una fibra de alto módulo con ese material. En el Japón, los investigadores de GIRIO consideraron que la investigación que los estadounidenses habían abandonado tenía potencial y que merecía la pena proseguirla. Desde la creación de la empresa GIRIO, el carbón había sido uno de los pilares de sus actividades de I+D. Poco después de la Segunda Guerra Mundial, sus actividades de I+D se centraron en las posibles mejoras que se podían realizar, como el aumento de la densidad de los productos de carbón y la producción de materiales de carbón para los reactores nucleares. En 1952, el Dr. Akio Shindo se incorporó en GIRIO, asignándosele la división de I+D sobre el carbón. (OMPI, s.f.).



Imagen 7. Caña de pescar telescópica.



Imagen 8. Notebook con carcasa de PRFC.



Imagen 9. Aspas de molinos de viento.



Imagen 10. Velero con casco de fibra de carbono (B60 Sloop).



Imagen 11. Joint Fighter es el mayor esfuerzo en tecnología aeronáutica jamás realizado, que utiliza la fibra de carbono al máximo. Foto Boeing X-32.

La Fibra de Carbono

2 La fibra de carbono en la construcción
 2.1 Características de la fibra de carbono

Características y aplicaciones de las fibras de carbono	
Propiedades	Aplicaciones
<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia, mecánica, tenacidad y densidad. • Estabilidad dimensional (logra conservar su forma) • Amortiguación de vibraciones, resistencia y tenacidad. • Resistencia a la fatiga y auto-lubricación. • Resistencia química y térmica. • Alta conductividad eléctrica • Compatibilidad biológica 	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte y artículos deportivos • Tecnología aeroespacial • Equipos de audio, brazos de robot • Maquinaria textil, ingeniería en general • Industria química y nuclear • Componentes equipos electrónicos • Medicina (prótesis, equipamiento quirúrgico)

La fibra de carbono es un polímero que se obtiene de calentar sucesivamente a altas temperaturas (hasta 1500 °C) otro polímero llamado poliacrilonitrilo. Este proceso de recalentamiento da lugar a la formación de unas cintas perfectamente alineadas de casi carbono puro en su forma de grafito, por ello su nombre de fibras de carbono.

Las fibras de carbono se desarrollaron de forma definitiva en Gran Bretaña en la década de los 60's, principalmente para la industria aeronáutica y aeroespacial. Combinadas con matrices epólicas resultan materiales compuestos que se caracterizan por poseer una elevada resistencia y un elevado módulo de elasticidad, siendo, sin embargo, un material sumamente ligero.

Tabla 2. Características y aplicaciones de las fibras de carbono.

La fibra de carbono cuenta con distintos tipos de fibras, con base al número de filamentos, con las temperaturas, entre otras características que a continuación se explicaran.

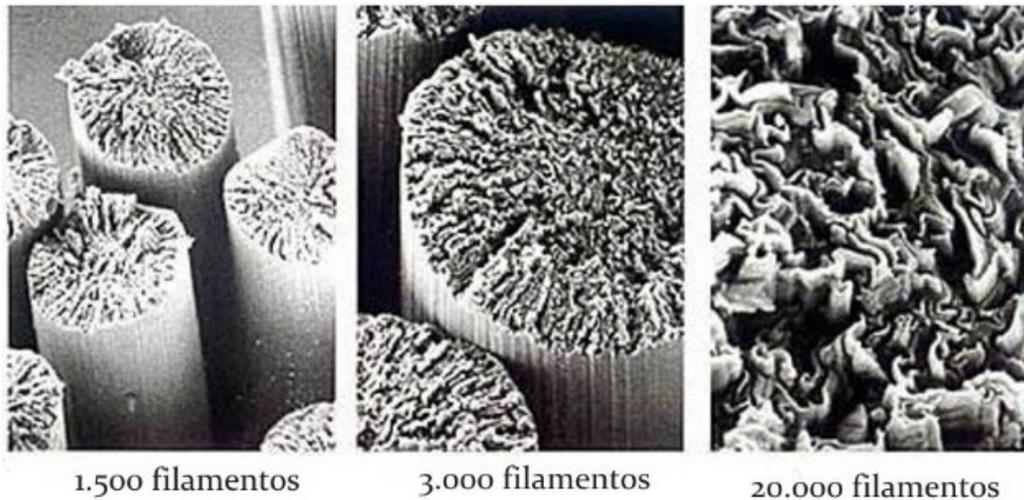
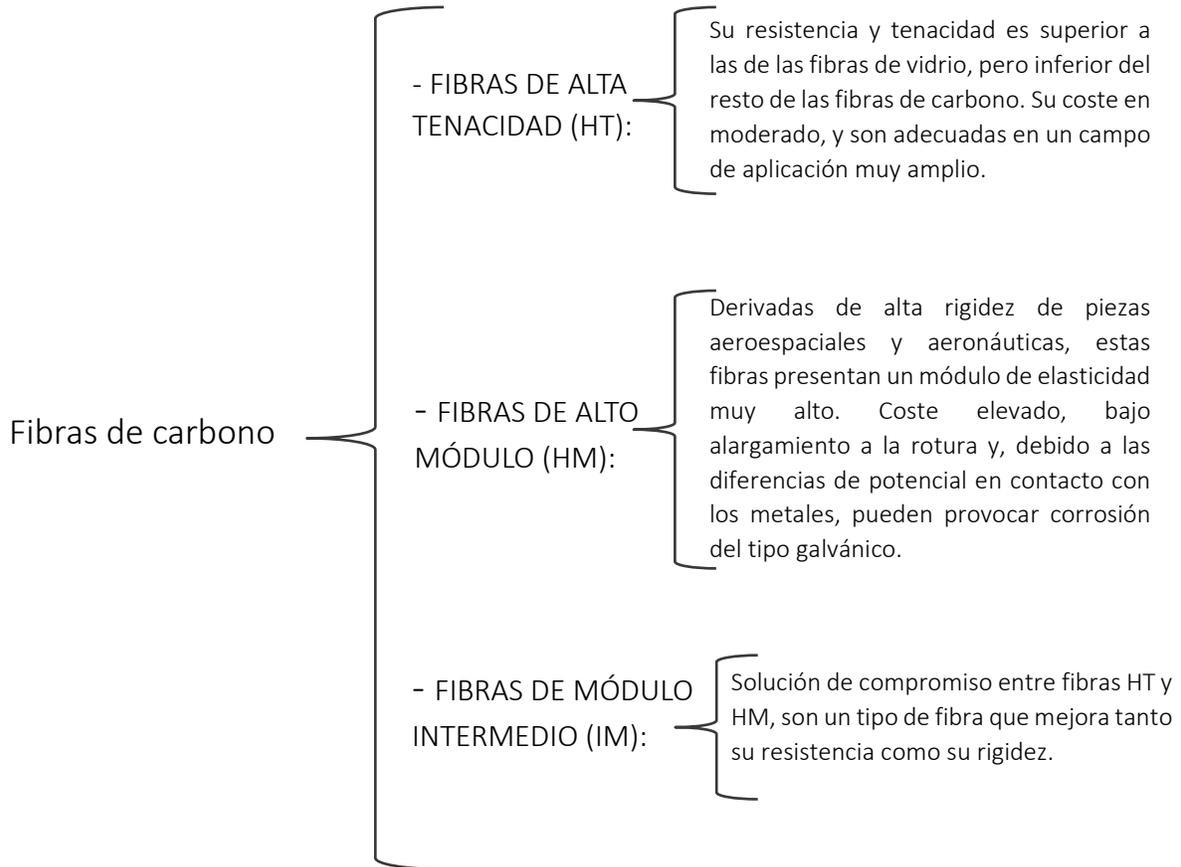


Imagen 7 Fibras de Carbono al microscopio. Tipos según la cantidad de filamentos por cada fibra.

Tipos de fibra de carbono

Hay tres tipos de fibra de carbono de acuerdo con las diferentes temperaturas que tienen: de alta tenacidad, de alto módulo y de módulo intermedio, a continuación, se hablará un poco más de ellos. (Besednjak, 2005).



Tipo	Carbono HT	Carbono HM	Carbono IM
Resistencia a la tracción (GPa)	2,6 – 5	2,0 – 3,2	3,4 – 5,9
Módulo elástico (GPa)	228 - 238	350 - 490	280 - 400
Densidad (Kg/m ³)	1740 - 1830	1790 - 1910	1730 - 1800
Alargamiento a la rotura (%)	1,2 – 2	0,4 – 0,8	1,1 – 1,9
Resistencia específica (GPa * cm ³ /g)	1,5 - 2	1,1 – 1,7	2,0 – 3,1
Módulo E específico (GPa * cm ³ /g)	127 - 134	190 - 260	160 - 200
Chef. Transmisión térmica (10 ⁻⁶ /°K)	-0,1 a -0,7	-0,5 a -1,3	--
Diámetro del filamento (µm)	7 - 8	6,5 - 8	5 - 7

Tabla 3. Principales propiedades de las fibras de carbono.

Propiedades mecánicas de las fibras de carbono

- Coeficiente de expansión térmica (negativo en una dirección de las fibras y positivo en el sentido transversal) Es posible que con la combinación de matrices y refuerzos no tenga deformaciones térmicas.
- Elevada resistencia y rigidez.
- Alta resistencia a la vibración.
- Buen comportamiento a la fatiga.
- Buena conductividad térmica.
- Bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Elevada resistencia relativa química a ácidos, disolventes y alcálisis.
- Las fibras de carbono no se ven afectadas por el contacto con agua de mar.

De acuerdo con estas características el costo del material a veces hace que se combine con otros materiales de refuerzo, sin necesariamente deteriorar su resistencia. *Esto dependerá del material que se utilice por lo que implica la consulta con los proveedores*

Cada filamento de carbono es la unión de muchos miles de filamentos de carbono, un filamento es un fino tubo con un diámetro de 5-8 micrómetros y consiste mayormente de carbono. Están combinados en mechas que contienen 5,000 y 12,000 filamentos, estas mechas pueden retorcerse en hilos y formar tejidos parecidos a los de la fibra de vidrio, también se encuentran tejidos híbridos de fibras de vidrio y carbono. (Desconocido, 2022).

Dada su fuerza o su resistencia su uso puede estar dirigido a la reparación de estructuras existentes o a la implantación directamente en obra. Su versatilidad es enorme, pues la naturaleza de la matriz puede ser muy diversa y la orientación y tamaño de las fibras pueden dar lugar a materiales con propiedades diferentes, con usos muy específicos y con diferentes precios.

En cualquier caso, estos materiales compuestos basados en carbono han supuesto una contribución determinante para el refuerzo de estructuras. Así, reparaciones para adaptación al cumplimiento de nueva normativa, como para reparación de defectos estructurales en la construcción o causados por desastres naturales. También se puede utilizar en la sustitución de estructuras metálicas afectadas por la corrosión son algunos de

los campos en los que se están usando sistemáticamente los materiales compuestos con carbono.

De tal manera que existen diferentes tipos de fibra de carbono, las cuales pueden ser un tejido, el cual que se adhiere con ayuda de resina epóxica (polímero), otro tipo sería fibra de carbono hecha una lámina o barra, donde su fabricación cambia pero al igual que la banda, se adhiere con ayuda de resina epóxica, el uso de cada una de ellas varía dependiendo del resultado en un análisis estructural realizado por un perito (especialista), algunos de los refuerzos donde principalmente se utiliza en flexión, cortante y confinamiento.

De esta forma se aplican de diferentes formas de acuerdo con el tipo de esfuerzo que vayamos a reforzar y de acuerdo con el elemento estructural. A continuación, se mencionará algunos ejemplos y formas donde se coloca la fibra de carbono.

- En vigas: En caras inferiores para incrementar su resistencia a flexión o en caras laterales, para su resistencia a corte.



Imagen 8 Aplicación de Fibra de Carbono en elemento estructural de concreto armado (viga).

- En muros de concreto: para mejorar su resistencia a flexión y cortante.



Imagen 9 Aplicación de Fibra de Carbono en muros de concreto (viga).

- En soportes de la industria automotriz: pudiendo incrementar las propiedades mecánicas de los mismos sin gran variación de la sección.
- En forjados de la industria automotriz: aligerados o no, especialmente en las caras inferiores del mismo.

Para que la fibra de carbono

En definitiva, hace uso de las propiedades de:

- Peso muy liviano (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.
- Muy flexible, adaptable a todas las formas de los elementos.



Imagen 10 Aplicación de Fibra de Carbono en columnas de concreto (viga).

Existen otros usos, más restringidos, dentro del campo de la construcción como son la sustitución de las armaduras de acero: experimentalmente o en puentes, como la utilización de parrilla de fibra de carbono que refuerzan al concreto y sustituyen al armado metálico (Rouingsfor de New Hampshire, EEUU) y el puente el río Assiniboin en Winnipeg en el estado de Manitoba, Canadá). O la conformación de algunos soportes o vigas lineales.



Imagen 11 Colección Conektors by A.P.O para MH Parquets.



Imagen 12 Puerta de fibra de Carbono.

En LAESKI nos hemos inspirado en la colección Conektors by A.P.O de MH Parquets, creada por Toni Pallejà, para proponer esta solución. Si sustituyéramos las tiras, los cuadrados o los rectángulos tan singulares que exponemos a continuación por fibra de carbono, sería espectacular.

2.2 Ventajas y desventajas de su uso

Entre las ventajas de usar la fibra de carbono como estructura de refuerzo están: mayor resistencia a los impactos, mayor resistencia al fuego y mejor aislamiento térmico, como conclusión de lo antes mencionado. El aumento de la resistencia aporta mayor capacidad a esfuerzos de tensión y confinamiento de los elementos compuestos. La fibra de carbono puede ser utilizada para reforzar vigas y restaurar su capacidad a la tensión, así como aumentar o reconstruir el confinamiento. La fibra puede ser utilizada en forma de tiras, cuando son vigas de concreto armado, esto con la finalidad de ayudar a contener los esfuerzos de tensión, si las varillas de acero están muy deterioradas. En las columnas, se considera una mejor disposición la colocación de un encamisado con fibra de carbono, restaurando su capacidad para resistir los esfuerzos (Moncayo-Theurer, 2016), esfuerzos de tensión cuando el acero ha dejado de ejercer su función y aumenta el confinamiento.

2.3 Uso de la fibra de carbono en las edificaciones

Pabellón de Fibra BUGA 2019 en Bundesgartenschau, Heilbronn, Alemania. Una cúpula hecha de nervaduras de fibra de vidrio y carbono revestidas con una membrana de ETFE transparente.

Encontramos este pabellón como un ejemplo de la aplicación de la fibra de carbono, un equipo de Bundesgartenschau, programó un robot para entregar más de 492.000 pies de filamentos fibrosos en una disposición espacial mediante la cual el tipo y la densidad de la fibra se podían variar en función de las cargas estructurales. Diseñado para imitar sistemas biológicos, las fibras de carbono rodean las fibras de vidrio transparente para formar elementos de estructura agrupados que se asemejan a los tejidos musculares flexionados. Según el equipo, un solo componente fibroso puede soportar alrededor de 25 toneladas o el peso de más de 15 coches. La cúpula, que tiene un espacio libre de alrededor de 75 pies y alberga un área de piso de 4,305 pies cuadrados, está compuesta por 60 de estos componentes, cada uno de los cuales pesa solo 16.8 libras por metro cuadrado.



Imagen 13 Pabellón de Fibra de Vidrio y Carbono BUGA 2019.

2.4 El uso de la fibra de carbono en las columnas dañadas por sismo

Con los sismos hemos notado que las consecuencias tanto económicas como pérdidas de vidas son muy notorias, por eso para mí es muy importante la intervención como el reforzamiento estructural para la reparación de edificios que presentan alguna manifestación de daño por sismo. Para así reducir el impacto que puedan tener los sismos sobre dichos edificios.

En caso de edificios existentes pueden existir dos posibilidades para hacer el reforzamiento con fibra de carbono:

- Reforzamiento Preventivo Estructural
- Reforzamiento de daños Postsismo (según peritajes)

De esta forma tenemos que considerar el mejoramiento estructural de edificios vulnerables al sismo. Esto es un asunto urgente. La intervención estructural antes de un evento sísmico es sin duda la mejor estrategia para mitigar el desastre. Sin embargo, si desafortunadamente un sismo, no considerado en los cálculos, puede causar daño a cualquier edificio, por lo tanto,

dichos edificios dañados por sismo serían la otra posibilidad para utilizar la fibra de carbono en su reforzamiento. Es importante intervenir la edificación dañada para la pronta recuperación y la mínima interrupción de la ocupación y funcionamiento para evitar pérdidas de vida y económicas.

En las últimas décadas, diversas tecnologías de refuerzo estructural han tenido un gran avance, una de ellas es la fibra de carbono, y la normativa sísmica actual toma más en serio los sismos y los pone en práctica. En edificios viejos se debería hacer peritaje de manera preventiva ya que fueron calculados bajo otra intensidad sísmica. Además de evaluar a través de un peritaje el estado actual de su estructura poder establecer el método más adecuado para su reforzamiento (en caso de ser necesario).



Imagen 14 Instalación de Fibra de Carbono horizontal en muros.

3 De los materiales como estructura

3.1 Definición de materiales

Es importante mencionar que los materiales son muy importantes ya que, gracias a ellos, en la actualidad podemos construir e ir mejorando cada vez las construcciones, por eso a continuación hablaremos de qué es la materia, cómo se formó, y para qué nos sirve, cuándo lo utilizamos, para poder comprender

La materia se constituye por partes infinitamente pequeñas, llamadas átomos, éste a su vez está dividido en varias partes aún más pequeñas como el núcleo. Pero el conjunto de átomos se agrupa en forma de moléculas, los átomos, son la parte esencial de los materiales, pues su congregación y configuración conforman los elementos químicos de la materia. Combinando los elementos químicos entre sí, se pueden generar compuestos. La combinación de dichos elementos depende de cada elemento y los electrones faltantes o excedentes en la última de sus órbitas.

Los materiales son sustancias complejas constituidas de distintos tipos de elementos químicos entrelazados, formando compuestos. Un material puede existir en la naturaleza de distinta forma, líquido, gas, plasma o sólido, este último es la base de las estructuras, dado que tienen forma y volumen definido, que son capaces de mantener aún con los cambios climáticos del ambiente, los otros estados, por lo regular solo son utilizados en su elaboración. Un material reaccionará de una forma característica ante las diversas acciones que sobre él se pueden ejercer. Las formas de las reacciones ante cada acción, depende de las características del material, definen sus propiedades y éstas determinarán si un material es adecuado o no para cumplir una función. (Gaytán, 2007).

Lo primero que debe cumplir un material es existir y existir en cantidad suficiente. Existen cuatro factores clave, para que un material sea adecuado para ser utilizado en la construcción arquitectónica:

- Estético: Para satisfacer la necesidad del ser humano de apreciar la construcción.
- Económico: El gasto que suponga la obtención del material no debe ser nunca superior al beneficio. Este factor económico podría decidir la eliminación de un material, aunque sus propiedades fuesen difícilmente sustituibles por otros.
- Durabilidad: La permanencia de cada uno de los materiales elegidos, dependerá de sus características y está directamente relacionada con los anteriores.
- Funcionalidad: Que tenga una utilización adecuada para lo que se le va a manejar en la construcción.

3.2 Materiales en la construcción

Como vimos en la línea de tiempo en la introducción, a través de la historia aproximadamente desde el año 10,000 a.C. se han descubierto y utilizado distintos materiales, siendo la piedra el inicio de la construcción, usada principalmente para cimentaciones, muros y pilares; los materiales fueron evolucionando a tierra, yeso, arena, entre otros; hasta los más actuales como el concreto, concreto armado, acero y fibra de carbono. Es decir, los materiales han ido modificando para, en la mayoría de los casos, mejorar su resistencia y/o durabilidad/calidad. Dentro de los materiales actuales y comúnmente utilizados son el concreto y el acero, los cuales tuve oportunidad de conocer en clases de la facultad, encontré que estos materiales son de suma importancia pues gracias a ellos se han podido construir edificios de grandes alturas, con formas geométricas irregulares, estos ayudan a construir estructuras que pueden llegar a soportar toneladas de peso, a tener menor riesgo de algún daño ante sismos o fuerzas externas. Con base en la investigación realizada, me surgieron dudas que espero algún día puedan ser contestadas,

¿Qué otros materiales podrán existir para mejorar las resistencias de los materiales más resistentes a la fecha?, ¿Cómo podrían ser las variaciones de estos y cómo serían las mezclas?, ¿Las formas geométricas pueden generar materiales?

3.3 Sistemas estructurales

Partiendo del concepto de estructura como elemento necesario para la obra, debemos considerar conceptos importantes como la carga, el esfuerzo y los requisitos esenciales en la construcción. Las estructuras, por complejas que sean, tienden a realizar sus trabajos principalmente a través de dos acciones básicas: tirar y empujar. No importa cual diferente sea la carga, no importa cuán compleja sea la estructura técnica, sus elementos siempre experimentarán tal trabajo. Son atraídos por la carga y por lo tanto estirados, o son empujados y por lo tanto comprimidos. En lenguaje estructural, se dice que las cargas provocan tensión en una estructura y deformaciones bajo tensión. Aunque el deterioro es causado por fuerzas externas, su efecto sobre la estructura es el resultado directo de fuerzas internas. Por tanto, tracción, compresión, cortante, flexión y torsión son modos en materiales estructurales sometidos a esfuerzos internos y no suelen presentarse de forma única o aislada, otros como la torsión son combinaciones de varios modos. A continuación, explicaremos cada esfuerzo antes mencionado.

Tensión: Es el estado en el que se encuentra sometido un cuerpo físico, que por causas de por fuerzas externas lo mantienen, ya sea alargado (tensión trabajando a tracción), o comprimido (una tensión trabajando a la compresión).

Tracción: Acción de dos fuerzas en sentido contrarias, que, actuando axialmente sobre un cuerpo físico sólido, tienden a alargarlo o estirarlo en la dirección del eje en que se aplican; Las partículas del material tienden a separarse, el acero y el aluminio trabajan bien a tracción.



Imagen 15 Ejemplo de un objeto a Tracción.

Compresión: Acción producida por fuerzas que tienen por efecto reducir el volumen de un cuerpo al apretarlo o presionarlo, produciendo en él una disminución de las distancias que separan a las partículas que lo componen; Las partículas del material se aprietan entre sí, las piedras y el concreto trabajan bien a compresión.



Imagen 16 Ejemplo de un objeto a Compresión.



Flexión: Es una combinación de las anteriores (Tracción y Compresión) por ejemplo en un tablón de madera sometido a flexión las fibras superiores se expanden mientras las inferiores se comprimen, además de que las intermedias no tienen variación; como ejemplo: en los elementos de concreto armado las varillas trabajan a la tracción y el concreto a la compresión.

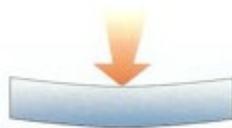


Imagen 17 Ejemplo de un objeto a Flexión.

Cortante: Se habla como cada una de las fuerzas iguales, paralelas y de sentidos contrarios además de ser infinitamente próximas, que, actuando casi tangencialmente en una sección de un cuerpo sólido, tratan de dividirlo en dos partes, cortándolo.

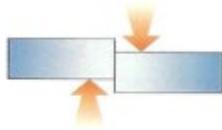


Imagen 18 Ejemplo de un objeto a Cortante.

Torsión: Es la aplicación de fuerzas sobre el eje longitudinal a un elemento en direcciones opuestas provocando un giro.



Imagen 19 Ejemplo de un objeto a Torsión.

Podemos concluir que cada uno de estos sistemas tiene sus propias capacidades para un propósito específico, es importante entender las características específicas de los sistemas estructurales para así tomar decisiones para prevenir y/o reparar cualquier daño de algún elemento estructural.

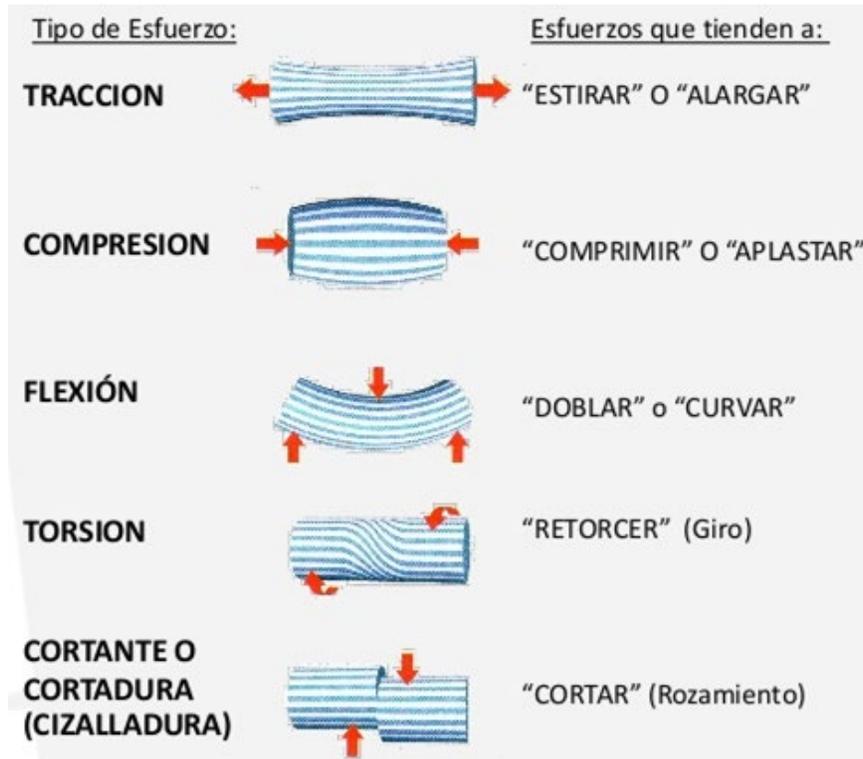


Imagen 20 Ejemplo de un objeto a sometido a diferentes esfuerzos.

3.4 Materiales que trabajan a compresión, flexión y tensión

La madera es uno de los materiales que puede trabajar a compresión ya que cuenta con un gran desempeño, este puede variar dependiendo de la dureza que tenga que puede presentarse desde los 12 MN/m² en el álamo hasta 70 MN/m² en algarrobo, pero también es resistente a cortante, suele trabajar considerablemente pero solo si está paralelo a las fibras que puede ser de 4 MN/m² en álamo y puede llegar hasta 18 MN/m² en roble blanco.

La piedra tiene buena resistencia a compresión, a diferencia de la madera, aquí consideramos a partir de 18 MN/m² en caso de ser piedra caliza y puede llegar hasta 212 MN/m² en granito; por otro lado, al momento de someterlo a tensión, la resistencia baja y ahora tendríamos que es de 4 MN/m² en piedra caliza y hasta 124 MN/m² en la pizarra.

Para el adobe, su resistencia a compresión es considerable, pero si es sometida a cortante es muy poca.

El ladrillo trabaja bien a compresión, pues alcanza una resistencia de hasta 150 kg/cm² en el ladrillo común, en cambio para el ladrillo recocido alcanza hasta 250 kg/cm², pero para el ladrillo vidriado llega hasta 350 kg/cm².

En el caso de concreto, su mayor resistencia es justamente a compresión ya que llega a alcanzar hasta 48000 KN/m² en cambio, si ponemos el concreto solo, es decir, sin armado, no es buen material para someterlo a tensión.

El acero tiene una tensión mínima de 400 a 550 MN/m² y una máxima de 820 MN/m², para compresión tiene una resistencia de 1000 hasta 12000 Kg/cm².

Con el concreto armado, podemos encontrar ciertas variaciones dependiendo del $f'c$, si lo estudiamos con un $f'c$ mínimo, puede ir de 100 a 300 kg/cm², esto sería para elementos comunes dentro de la construcción; para cortante con $f'c$ mínimo, sería de 4200 kg/cm².

Materiales para uso estructural 3.5 Acero y concreto como material estructural

Así como es importante tener en cuenta los diferentes esfuerzos que se pueden generar, los diferentes materiales son la materia prima para las construcciones, por lo cual debemos conocerlos, entender cómo trabajan, sus características y propiedades y tomar en cuenta cómo es que los podemos emplear dentro de los proyectos arquitectónicos.

Los materiales principales utilizados en la construcción de estructuras son el Acero estructural y el concreto (armado o pretensado). Pueden utilizarse como materiales predominantes en la estructura o pueden usarse conjuntamente (construcción mixta). Cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes que se pueden resumir así:

- El concreto resiste el fuego y la humedad mejor que el acero.
- El concreto no resiste la tracción, el acero sí.
- El concreto tiene antes el límite de rotura. No es apropiado para edificaciones de gran altura.
- El concreto es un material frágil, mientras que el acero es dúctil. En el caso del concreto, dúctil hace referencia a la poca deformación que adquiere el concreto antes de la ruptura (poca pero no nula).

El concreto lo obtenemos de mezclar elementos áridos con agua y un conglomerante, gracias a que se forma un tipo de paste, este puede ser moldeado para obtener la forma requerida, para esto se necesitan cimbras, los cuales son los moldes con la forma que se desea, regularmente suele armarse con madera; al solidificarse se vuelve un elemento con alta resistencia, dureza y durabilidad.

También es utilizado como un material resistente, suele ser usado para zapatas, muros de contención (para cimentaciones), muros, columnas, muelles, pisos, pavimento, etc; como material decorativo puede ser en mobiliario, piedras artificiales, barandales, entre otros; y por último se puede utilizar para formar concreto armado que es la unión de concreto con acero.



Imagen 21 Aplicación de concreto.

El acero es un material con muchas cualidades, por tal motivo es actualmente uno de los materiales más utilizados en las estructuras, algunas de ellas es que es un material duro y resistente a distintos esfuerzos, como lo son la compresión y la tracción, adicionalmente es un material estético que se puede llegar a combinar con otros.

Es utilizado como material resistente por lo cual es aplicado para los elementos estructurales: columnas, trabes, losas, cubiertas, entre otros; también se puede utilizar como material decorativo: celosías, mobiliario, herrajes, cercas, barandales, etc; y como material para ser combinado: armado, mallas de refuerzo, etc.



Imagen 22 Ejemplo edificio de Acero (Centro Pompidou).

El concreto armado consiste en mezclar concreto con acero, esto fue posible gracias a que cuentan con casi el mismo coeficiente de dilatación térmica, por tal motivo no presentan agrietamientos, se forma un sistema donde el acero absorbe los esfuerzos a tensión y torsión mientras que el concreto trabaja a compresión y envuelve al acero para evitar contacto con el medio ambiente y generar oxidación.

Su utilización como material resistente es en pilotes, zapatas, cimentaciones, muros, columnas, trabes, losas, cubiertas, cerramientos, pisos, pavimentos, pretensados, postensados, membranas, prefabricados, como derivados puede ser el ferrocemento y como material decorativo se usa para mobiliario, monumentos, prefabricados, entre otros.



Imagen 23 Ejemplo edificio de Concreto Armado.

4 Columnas de concreto de la Línea 12 del metro. Caso estudio.

Estudiaremos el reforzamiento de las columnas de concreto armado del viaducto elevado, con la finalidad del cumplimiento de las nuevas actualizaciones del reglamento.

El viaducto elevado de la línea 12 del metro consta de 200 columnas aproximadamente de las cuales solo se van a reforzar 152 columnas de acuerdo con los resultados arrojados de un análisis estructural. Las 48 columnas que no se reforzaran son aquellas que están cerca de las estaciones del metro.

El reforzamiento consiste en una serie de procedimientos a seguir, los cuales se mencionarán a detalle más adelante.



Imagen 24 Foto de la Línea 12 del metro, antes del reforzamiento de las columnas.

4.1 Limpieza / preparación

Para poder instalar la fibra de carbono, se necesitan llevar a cabo algunos procedimientos para dejar lista la superficie a reforzar, a continuación, explicaré a detalle cada procedimiento.

Como primer procedimiento consiste en sellar las grietas que tiene la columna, esto se lleva a cabo con unos puertos de inyección, la cual inyecta una pasta epóxica que sirve para calafatear.



Imagen 25 Colocación puertos de inyección.

Se localizan las grietas existentes en las columnas, posteriormente se colocan los puertos de inyección, los cuales, por medio de una máquina, será enviada resina epóxica a manera de sellar dichas grietas y dejar una superficie completamente sellada y lisa.



Imagen 26 Maquina para inyectar resina epoxica.

Para poder inyectar la resina en las grietas encontradas en las columnas, ocupamos una maquina de inyección a presión de resina epóxica, la cual funciona por medio de electricidad, esta manda la resina por medio de mangueras a los puertos de inyección previamente colocados.

Una vez listos los puertos de inyección como la máquina, se enciende y comienza la inyección con la resina para sellar las grietas, esto se tiene que ir haciendo uno por uno para asegurar que se está introduciendo correctamente la resina.

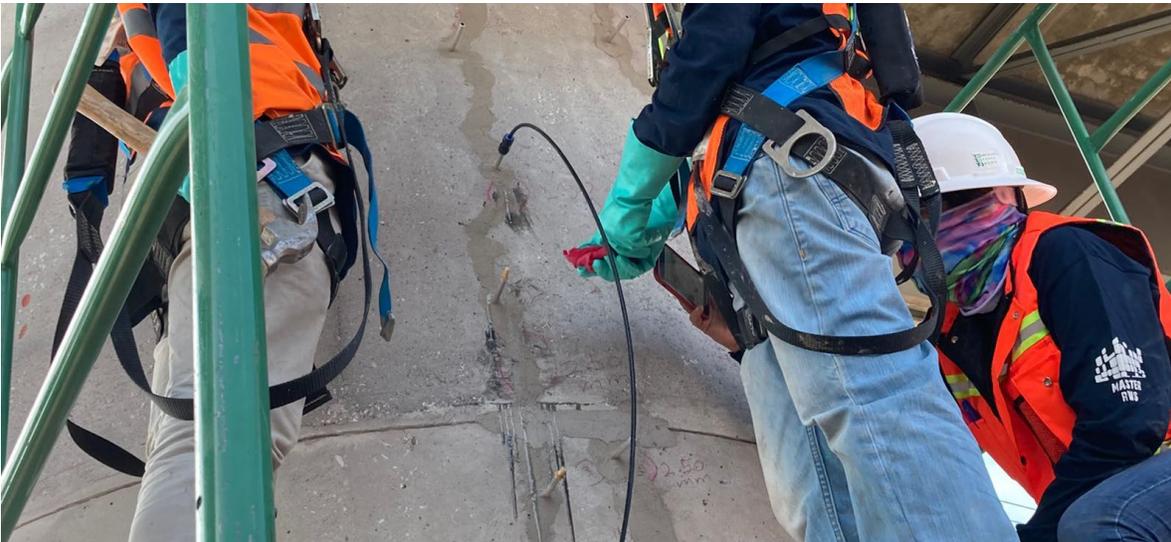


Imagen 27 Puertos de inyección de pasta epóxica para sellar grietas.



Imagen 28 Puertos de inyección después del sellado de grietas.

Finalmente se dejan secar los puertos de inyección por aproximadamente 1 día, después cortan el material residual para poder tener una superficie lisa y regular.

Posteriormente, una vez secos los puertos de inyección, se comienza con la limpieza y preparación de dichas columnas, lo cual consiste en mover una bajada de agua dando paso a rellenar ese espacio con grout para tener una superficie más regular y que al momento de colocar la fibra de carbono, logre tener contacto total.



Imagen 29 Recolocación de tubería de bajada de agua.

Las columnas tenían un espacio dentro de la misma columna, donde contenían una tubería de bajada de agua, dicho espacio intervenía para la colocación de la fibra, para esto se tuvo que recorrer dicha tubería para posteriormente rellenar el espacio para poder así obtener una superficie regular.



Imagen 30 Cambiando de una superficie lisa a una superficie áspera.

Una vez recolocada la tubería, comenzamos a picar el concreto, esto con la final de lograr una mejor adherencia del concreto existente con el grout, con el cual se rellenará el espacio para tener una geometría regular.



Imagen 31 Preparación y colocación de la cimbra de la columna.

Como siguiente paso es poner una cimbra de metal para contener el grout con el cual se rellenará el espacio, que funciona como una cimbra.



Imagen 32 Fijación de cimbra en la columna.

Dicho encamisado se coloca a todo lo alto de la franja para rellenar y se amarran con una especie de cintas que abrazan toda la columna para que al momento que el grout se vierta, la presión que ejerce no aviente el encamisado.



Imagen 33 Aseguramiento de la cimbra en la columna.



Imagen 34 Llenado de espacio liberado en la columna.

Una vez colocada la cimbra y asegurada, comienzan a verter el grout por medio de una manguera para que se vaya distribuyendo bien y lo dejan secar por 1 día, para que la cimbra pueda ser retirada.



Imagen 35 Descimbrado y marcación de columna.

Una vez fraguado el grout y descimbrada la columna, procedemos a marcar con masking las medidas de la 50cm para la colocación de la fibra de carbono.

La columna para este momento está lista para comenzar con la aplicación de la fibra de carbono, para esto se deberá cortar tiras de 50cm de ancho por 1.20m de largo, este procedimiento por cuestiones de tiempos y espacio se realiza en los talleres de la empresa.



Imagen 36 Rollos de fibra de carbono.

En esta imagen podemos observar la fibra de carbono en rollos, los cuales ya están cortados a la medida de 50cm de ancho por 1.20m de largo, solo se trasladan al lugar de la instalación y comienzan su aplicación.



Imagen 37 Entrega de la fibra de carbono al sitio.

En este momento llega la fibra de carbono al sitio de la instalación, el cual ya previamente fue marcado para la correcta instalación de la fibra de carbono.

4.2 Aplicación resina

Una vez que se tiene todo listo, se realiza la preparación de la resina, la cual consiste en 3 partes de resina epóxica (esta resina es especial para fibra de carbono), por 1 de catalizador, se revuelve bien con la ayuda de una mezcladora eléctrica para asegurar que la mezcla esté uniforme, para comenzar a aplicarla directo al concreto, esto se hace con ayuda de un rodillo, cabe mencionar que el personal debe contar con equipo de seguridad, como lo es: casco, guantes, cubrebocas, botas y chalecos.



Imagen 37 Entrega de la fibra de carbono al sitio.

Para este momento, teniendo la superficie de la columna limpia y marcada, se comienza a colocar la resina epóxica con ayuda de un rodillo, se debe aplicar una capa generosa de esta. El personal deberá portar elementos de seguridad, principalmente guantes y cubrebocas.

4.3 Aplicación fibra de carbono

Tras la aplicación de la resina epóxica, procederemos a colocar la primera tira de fibra de carbono antes mencionada, acomodándola dentro de las marcas realizadas, asegurando que toda la fibra entre en contacto con la superficie con resina epóxica.



Imagen 38 Colocación de la fibra de carbono.

Teniendo la capa de resina aplicada en la columna, se comienza a colocar la tira de fibra de carbono, poco a poco, con la finalidad que toda la fibra entre bien en contacto, evitando así las burbujas de aire. Se debe tener mucho cuidado de no dejar ninguna burbuja de aire ya que, si se encuentra una, la fibra de carbono no podrá trabajar como tiene que ser.



Imagen 39 Confirmación de la adherencia.

Posterior a la colocación de la fibra de carbono, pasamos otro rodillo mas pequeño para asegurar que la fibra de carbono esta en completa adherencia y en dado caso que hubiera una burbuja de aire, poder eliminarla.



Imagen 40 Colocación de la fibra de carbono en todo lo largo.

Seguiremos repitiendo el mismo procedimiento anterior, de ir colocando la fibra de carbono en todo lo alto de la columna de concreto armado, hasta llegar a la parte alta de la columna.

4.4 Aplicación resina

Se le coloca de nuevo resina encima de la fibra de carbono, dejándola así muy bien cubierta, se le da unos ligeros toques sobre la fibra de carbono, esto con la finalidad de que toda la fibra absorba bien la resina.



Imagen 41 Colocación de otra capa de resina sobre fibra de carbono.

Después de dejar secar la primera capa de fibra de carbono, se comienza a repetir los mismos pasos, aplicar resina epóxica para después colocar la fibra de carbono. La cantidad de capas de fibra de carbono van de acuerdo con la resistencia que se pretende llegar y análisis por parte de los peritos, en este caso en algunas columnas se requirieron 2 capas algunas otras 3 capas, lo recomendable es que no pase de 3 o 4 capas, pues al superar este numero ya no trabaja adecuadamente.

4.5 Aplicación fibra de carbono para cierre de juntas

Se le pondrá otra tira de fibra de carbono, pero esta vez con un ancho de 5cm, con el mismo largo antes mencionado, esta se colocará entre una tira y otra de fibra de carbono, dando así una unión o empalme entre tira y tira. Esta tiene una función de cerramiento de entre las tiras de carbono, dando así un mejor soporte a todo el reforzamiento.

4.6 Aplicación arena

Ya terminada la colocación de resinas, se le esparcirá arena silica directo a la resina para que quede bien impregnada, dejando así un acabado rugoso y firme.



Imagen 42 Colocación de acabado rugoso.

Una vez seca la última capa de fibra de carbono, uno de los penúltimos procedimientos a realizar es, poner el acabado, en este caso se busco un acabado rugoso, para esto se ocupó arena silica. Primero se le aplica resina generosamente, teniendo cuidado de no escurrir porque cuando seque, quedara la gota escurrida, posterior a esto sin dejar que seque la resina, se comienza a esparcir arena silica con las manos, cuidando de cubrir toda la superficie y asegurándose que quede completamente impregnada.



Imagen 43 Columnas con fibra de carbono y acabado rugoso.

En esta imagen podemos ver las columnas con la aplicación de la fibra de carbono y terminar con el acabado rugoso dado por la arena silica.



Imagen 44 Columnas cubiertas después de la aplicación.

Al finalizar se cubren las columnas con el fin de garantizar un mejor secado y adherencia de la fibra de carbono, así como por protección por las lluvias, por el sol, entre otros factores externos.

4.7 Recubrimiento contras rayos V

Como acabado final, le colocan un recubrimiento contra los rayos UV, ya que están al exterior y por tal motivo les llega rayos del sol, para evitar un deterioro apresurado o algún tipo de corrosión.



Imagen 45 Columnas con recubrimiento contra los rayos UV.

Finalmente, se le aplica un recubrimiento contra los rayos UV, esto con la finalidad de proteger y permitir mas tiempo de vida útil, ya que al estar a la intemperie pueden influir diversos factores ajenos a la mano del hombre a que tenga cierta corrosión o el desgaste apresurado.



Imagen 46 Detalle de columna con acabado de arena y recubrimiento contras los rayos UV.



Imagen 47 Columnas terminadas.

En esta imagen, podemos observar las columnas ya terminadas, con los cambios que se tuvieron que realizar y con las aplicaciones tanto de fibra de carbono como de acabados.

Cabe mencionar que en la parte inferior se dejó un espacio de 50cm a la cual no se le aplicó el recubrimiento contra los Rayos UV, ya que el paso a seguir del proyecto es colocarle un encamisado de acero alrededor de la parte inferior de la columna para agregar en la parte del vano una especie de porterías de acero para darle un mayor soporte, tras el lamentable suceso de 2021.

Reflexiones

El objetivo de este trabajo era conocer en primer lugar demostrar el costo beneficio de la aplicación de la fibra de carbono como reforzamiento en columnas de concreto armado que han sufrido diferentes esfuerzos.

Indagando sobre el material, fue importante analizar los antecedentes y la evolución del material para así poder entender las características y propiedades que posee la fibra de carbono para posteriormente hacer un análisis con respecto a los materiales más comunes en el mercado para el reforzamiento de columnas específicamente de concreto armado.

En la actualidad se ha ido implementando poco a poco más el uso de dicho material, por tal motivo se ha podido comprender mejor las ventajas y desventajas de la utilización de la fibra de carbono, en este punto encontramos diferentes factores que hicieron que entendiera que cada reforzamiento es único y la aplicación de la fibra dependerá de un peritaje previo para que pueda ser definido el cómo, el porqué y el dónde tendrá que colocarse dicha fibra.

Se analizó de acuerdo con lo que nos ofrece la fibra, como sus características, el modo de aplicación, tiempos de instalación para poder compararlo con el beneficio que nos brinda a corto, mediano y largo plazo para entender la viabilidad que nos ofrece en las estructuras que han sufrido afectaciones, ya sea por sismos o por algún otro tipo de esfuerzo.

Durante esta investigación, me he dado cuenta de la evidente viabilidad que tiene la fibra de carbono para reforzar estructuras en este caso de concreto armado. Este material ha permitido que en las estructuras en las cuales se aplica, logren a obtener una resistencia muy superior a la que tenía dicha estructura, no agrega mucha carga ya que es muy liviana, es fácil y rápido de colocarla y no compromete la seguridad de la edificación posteriormente.

Es importante mencionar que con la fibra de carbono nos deja muchas incógnitas que podrán ser resueltas con el paso del tiempo, una de ellas es saber si en un futuro podrán ser reforzadas superficies regladas o amorfas, si podremos aplicar la fibra de carbono en otros materiales además del concreto y acero, y saber que otros alcances y presentaciones podamos encontrar en este material, estoy segura avanzará la tecnología y se convertirá en un material más utilizado en el mercado.

Glosario

Poliacrilonitrilo: es una resina polimérica sintética, semicristalina, con la fórmula lineal $(C_3H_3N)_n$. Aunque es termoplástico, no se funde en condiciones normales. Se degrada antes de la fusión. Casi todas las resinas de poliacrilonitrilo son copolímeros fabricados a partir de mezclas de monómeros con acrilonitrilo como componente principal.

Alótropo: Forma o fase en la cual se puede presentar un elemento químico.

Conglomerante: (adj.) Dicho de un material: Capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, originando nuevos compuestos.

frágil: (Del lat. fragīlis). adj. Quebradizo, y que con facilidad se hace pedazos.

dúctil: (Del lat. ductīlis). adj. Dicho de un metal: Que admite grandes deformaciones mecánicas en frío sin llegar a romperse.

Pretensado: con una armadura de acero especial, sometida a tracción previamente a la puesta en obra.

Grout: es un relleno estructural para la colocación bajo estructuras y maquinaria. Mortero especializado para el relleno de espacios. Mortero que no tenga contracción o que tenga expansión positiva.

Bibliografía

- Besednjak Dietrich A. (2005). *Materiales compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones*. (1°ed) [Google Books] Barcelona: Ediciones UPC. books.google.com.mx [En línea]. Recuperado de: https://books.google.com.mx/books?id=gMSg5rURr6sC&pg=PA41&dq=principales+propiedades+de+la+fibra+de+carbono&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjhu3-g_X5AhU4kmoFHeoPBR8Q6AF6BAgHEAI#v=onepage&q&f=false
- CarboSystem. (s.f.). "Fibra de Carbono: estructura y propiedades". *CarboSystem. Blog dedicado a los materiales y a sus aplicaciones*. <https://carbosystem.com/> [En línea]. Recuperado de: <https://carbosystem.com/fibra-de-carbono-2/>
- Fibra de Carbono.es (2015). "¿Qué es la Fibra de Carbono?". *Fibra de Carbono.es: Blog dedicado a la Fibra de Carbono, usos, aplicaciones y tienda dedicada a venta de Fibra de Carbono*. <https://www.fibradecarbono.es/> [En línea]. Recuperado de: <https://www.fibradecarbono.es/articulos/que-es-fibra-carbono/>
- Gaytán Martínez J. Aarón. (2007). *Nuevos Materiales Aplicados a las Estructuras*. Nanotecnología en la Arquitectura – Caso de estudio: Fibra de Carbono. [TesiUNAM Digital] México: UNAM–Dirección General de Bibliotecas. [En línea]. Recuperado de: <http://132.248.9.195/pd2007/0615222/Index.html>

- Llano Uribe C. (s.f.) "Fibra de Carbono, Presente y futuro de un material revolucionario". *Metal Actual*, 1, 10-15. <https://doi.org/10.2307/332951> [En línea]. Recuperado de: <https://www.kimerius.com/app/download/5781437408/Fibra+de+Carbono.+Presente+y+futuro+de+un+material+revolucionario.pdf>
- Moncayo Theurer, M.; Rodríguez, J.; Alcívar; López; Soriano; Villacis. (2016). *Las Fibras de Carbono como una Alternativa para Reforzamiento de Estructuras*. (1ª ed., Vol.20). Universidad Autónoma de Yucatán, Ingeniería. [En línea]. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750927006.pdf>
- MotorGiga (s.f.). "Carbono-Definición-Significado". *MotorGiga: Blog dedicado a materiales, automóviles, tecnología, etc. diccionario.motorgiga.com* [En línea]. Recuperado de: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/carbono-definicion-significado/gmx-niv15-con193410.htm>
- Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). (s.f.). *La patente que transformó a todo un sector*. Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). <https://www.wipo.int/portal/es/> [En línea]. Recuperado de: https://www.wipo.int/ipadvantage/es/articles/article_0152.html#:~:text=El%20origen%20de%20la%20fibra,filamento%20en%20las%20bombillas%20el%C3%A9ctricas
- Palacios Alquisira, J. (2019). "Elementos Químicos: El Carbono, C.". *Boletín de la Sociedad Química de México*, 13(1), 15-17. <https://bsqm.org.mx/> [En línea]. Recuperado de: <chrome-extension://efaidnbmnribpcajpcglclefindmkaj/http://bsqm.org.mx/pdf-boletines/V13/V13N1/BSQM191301%20completo.pdf>

- Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la Lengua Española*. Real Academia Española y Asociación de Academias de la Lengua Española. [En línea]. Recuperado de: <https://dle.rae.es/>
- Sika Colombia S.A.S. (2017). *Reforzamiento de Estructuras de Concreto. Técnicas y Materiales*. Sika Colombia S.A.S <https://col.sika.com/> [En línea]. Recuperado de: <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/c5fbb55d-9240-3b09-9eee-edf695806345/Reforzamiento%20Estructuras%202017.pdf>
- Tecnología de los Plásticos (2011). *Fibra de Carbono*. Tecnología de los Plásticos: Blog dedicado a los materiales plásticos, características, usos, fabricación, procesos de transformación y reciclado. tecnologiadelosplasticos.blogspot.com [en línea]. Recuperado de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/11/fibra-de-carbono.html#:~:text=El%20alto%20potencial%20de%20la,%2DRoyce%2C%20Morganita%20y%20Courtaulds.>