



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO I**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:**

**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO**

**REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO Y SOLUCIONES UTILIZADAS EN EL DISTRITO**

**CENTRAL**

**PRESENTADO POR:**

**11741036 GABRIEL ADOLFO VILLANUEVA ORDOÑEZ**

**11911047 CRISTHIAM ALEXIS JIMÉNEZ VARGAS**

**ASESOR TEMÁTICO: MSC. ING. VÍCTOR ALONZO MARTÍNEZ REYES**

**ASESORA METODOLÓGICA: MSC. ING. KARLA ANTONIA UCLÉS BREVÉ**

**CAMPUS TEGUCIGALPA; ENERO, 2024.**

## DEDICATORIA

A nuestros pilares fundamentales, nuestras familias, les dedicamos este trabajo con profundo agradecimiento por su amor, paciencia y constante aliento. A nuestras amistades cercanas, quienes han sido testigos de nuestras luchas y triunfos, les expresamos nuestro agradecimiento. Su amistad ha sido una fuente constante de inspiración y motivación a lo largo de esta travesía académica. A todos los maestros y asesores que han formado parte de este camino, les dedicamos este logro con profundo respeto y reconocimiento. Su guía y conocimiento han sido la brújula que nos ha orientado hacia el éxito. Cada lección compartida ha dejado una huella imborrable en nuestra formación académica y personal.

Este trabajo no solo representa el cumplimiento de un objetivo académico, sino también el fruto de la colaboración, la enseñanza y el apoyo mutuo. A todos los que han contribuido de alguna manera, les extendemos nuestro más sincero agradecimiento. Este logro es de ustedes tanto como nuestro.

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestra sincera gratitud a todas las personas e instituciones que han contribuido de manera completa al desarrollo y culminación de este trabajo de investigación. En particular, deseamos reconocer y agradecer a:

Lazarus&Lazarus, Tegucigalpa:

Agradecemos a la empresa Lazarus&Lazarus por su generoso apoyo y colaboración durante el proceso de nuestra investigación. Su participación fue fundamental, proporcionándonos valiosas entrevistas y datos que enriquecieron nuestro trabajo. La disposición y compromiso de Lazarus&Lazarus fueron un pilar clave en la consecución de nuestros objetivos.

Ingeniera Karla Uclés:

Extendemos nuestro agradecimiento a la Ingeniera Karla Uclés por su valioso aporte en las asesorías metodológicas. Su experiencia y orientación fueron esenciales para la correcta estructuración y enfoque de nuestro trabajo. Su dedicación y conocimientos han dejado una marca en nuestra investigación.

Ingeniero Víctor Alonso Martínez:

Queremos expresar nuestra profunda gratitud al Ingeniero Víctor Martínez por su apoyo constante y asesoramiento en aspectos temáticos cruciales de nuestra tesis. Su experiencia y visión han sido fundamentales para el desarrollo de nuestras ideas y la comprensión profunda de los conceptos clave.

A todos aquellos que, de una forma u otra, contribuyeron a este proyecto, les estamos agradecidos. Su colaboración ha sido esencial para el éxito de esta investigación.

## **EPÍGRAFE**

*La investigación es ver lo que todo el mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado.*

*- Albert Szent-Györgyi*

## RESUMEN EJECUTIVO

La revisión bibliográfica se ha enfocado en el reforzamiento de estructuras de concreto con fibras de carbono, una tecnología ampliamente utilizada a nivel global para mejorar la resistencia y durabilidad de estructuras existentes. En el contexto del Distrito Central, esta técnica aún no ha adquirido relevancia en la industria de la construcción como una solución eficiente para abordar problemas de deterioro y vulnerabilidad estructural.

El trabajo de investigación se ha desarrollado para documentar el uso de la fibra de carbono como parte del reforzamiento para estructuras de concreto armado y a pesar de que las CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer por sus siglas en inglés) gozan de una adopción generalizada en la región, países vecinos como Costa Rica y Guatemala las consideran como soluciones de relevancia en el ámbito de la ingeniería estructural.

La investigación se centra en analizar la viabilidad y el potencial de las CFRP como método de refuerzo estructural, donde se examina detalladamente las diversas aplicaciones y técnicas empleadas en estudios previos. Se abordan los beneficios y desafíos asociados con el uso de estas fibras de carbono, así como las lecciones aprendidas de experiencias internacionales.

El trabajo de investigación se ha desarrollado para proporcionar una comprensión integral de las posibilidades que ofrecen las CFRP para reforzar las estructuras y su uso en el contexto del Distrito Central, identificando las razones detrás de su limitada implementación en comparación con regiones vecinas, mediante este análisis, se busca contribuir al conocimiento existente y brindar apoyo valioso para futuros proyectos de reforzamiento estructural en la región.

En la fase final de esta investigación, se presentarán conclusiones y recomendaciones basadas en los hallazgos obtenidos, con el objetivo de ofrecer una guía práctica para ingenieros, profesionales del sector de la construcción interesados en mejorar la capacidad estructural de edificaciones existentes en la región. Además, se pretende fomentar la adopción de tecnologías innovadoras que contribuyan al desarrollo sostenible y a la resiliencia de las infraestructuras en el Distrito Central.

Palabras clave: adherencia, cargas de compresión, cargas de tensión, confinamiento, fibra de carbono

## **ABSTRACT**

The literature review has focused on the reinforcement of concrete structures with carbon fibers, a widely used technology globally to enhance the strength and durability of existing structures. In the context of the Central District, this technique has not yet gained significance in the construction industry as an efficient solution to address issues of deterioration and structural vulnerability.

The research work has been developed to document the use of carbon fiber as part of the reinforcement for reinforced concrete structures. Despite the widespread adoption of CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) in the region, neighboring countries such as Costa Rica and Guatemala consider them as relevant solutions in the field of structural engineering.

The research focuses on analyzing the feasibility and potential of CFRP as a method of structural reinforcement, where the various applications and techniques used in previous studies are examined in detail. The benefits and challenges associated with the use of these carbon fibers are addressed, as well as the lessons learned from international experiences.

The research work has been developed to provide a comprehensive understanding of the possibilities offered by CFRP for reinforcing structures and their use in the context of the Central District, identifying the reasons behind their limited implementation compared to neighboring regions. Through this analysis, the aim is to contribute to existing knowledge and provide valuable support for future structural reinforcement projects in the region.

In the final phase of this research, conclusions and recommendations will be presented based on the findings obtained, with the aim of offering a practical guide for engineers and professionals in the construction sector interested in improving the structural capacity of existing buildings in the region. In addition, the aim is to promote the adoption of innovative technologies that contribute to the sustainable development and resilience of infrastructure in the Central District.

Key words: adhesion, carbon fiber, confinement, compression loads, tension loads

## ÍNDICE DE CONTENIDO

I	Introducción .....	1
II	Planteamiento del Problema.....	2
2.1	Precedentes del problema.....	2
2.2	Definición del problema.....	3
2.3	Justificación .....	3
2.4	Preguntas de Investigación .....	4
2.5	Objetivos .....	4
2.5.1	Objetivo General .....	4
2.5.2	Objetivos Específicos .....	5
2.5.3	Retos Relacionados con la Investigación en el Distrito Central.....	5
III	Marco teórico.....	6
3.1	Técnicas de rehabilitación para fallas en elementos estructurales de concreto.....	7
3.1.1	Fallas estructurales en elementos de concreto armado.....	7
3.1.1	Técnicas de rehabilitación convencionales.....	11
3.1.2	Implementación de nuevas tecnologías FRP en rehabilitación de estructuras ...	12
3.2	Polímeros FRP .....	14
3.2.1	Polímeros utilizados en la construcción .....	14
3.3	Fibra de Carbono como refuerzo de elementos estructurales .....	19
3.3.1	Refuerzos con Fibras de Carbono.....	19
3.3.2	Durabilidad del reforzamiento.....	21
3.4	Propiedades mecánicas de la fibra de carbono.....	23
3.4.1	Comportamiento a la tracción .....	23
3.4.2	Comportamiento a compresión .....	23
3.5	Materiales para reforzar estructuras con fibra de carbono.....	24

3.5.1	Fibras de carbono .....	24
3.5.2	Resina epoxi .....	25
3.5.3	Cuchillas y tijeras.....	25
3.5.4	Guantes y equipo de protección.....	26
3.5.5	Herramientas de preparación de superficie.....	26
3.5.6	Capas separadoras y materiales de liberación.....	26
3.5.7	Selladores y adhesivos adicionales .....	26
3.6	Refuerzo por flexión de la fibra de carbono en elementos estructurales.....	27
3.6.1	Resistencia a la flexión .....	28
3.6.2	Resistencia a la flexión de la fibra de carbono.....	29
3.7	Refuerzo por confinamiento con fibra de carbono en elementos estructurales .....	33
3.7.1	Resistencia al confinamiento .....	33
3.7.2	Resistencia al confinamiento de la fibra de carbono .....	36
3.8	Refuerzo por cortante de fibra de carbono en elementos estructurales.....	43
3.8.1	Resistencia al cortante.....	44
3.8.2	Resistencia al cortante de la fibra de carbono.....	49
3.9	Mecánica de adherencia de la fibra de carbono al concreto .....	52
3.9.1	Normativas y códigos.....	57
3.10	Usos de refuerzo con fibra de carbono a nivel mundial .....	58
3.10.1	Torre Chocavento en Perú.....	59
3.10.2	Tren eléctrico de Lima – Perú.....	61
3.10.3	Cube – Alemania .....	64
3.10.4	Edificio Laureano Costa Rica.....	65
3.11	Softwares para el diseño de refuerzos con laminados de fibra de carbono .....	67
3.11.1	SIKA CarboDur Design Software .....	67

IV	Metodología.....	69
4.1	Enfoque.....	69
4.2	VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	70
4.3	Técnicas e instrumentos aplicados.....	71
4.3.1	Fuentes primarias.....	71
4.3.2	Investigación de fuentes secundarias.....	71
4.4	Metodología de estudio.....	72
V	Resultados y Análisis.....	74
5.1	Módulo de elasticidad.....	74
5.2	Resistencia a la tensión.....	75
5.3	Deformación última a la tensión.....	77
5.4	Tipología de la Fibra de Carbono.....	78
VI	Conclusiones.....	82
VII	Recomendaciones.....	85
VIII	Bibliografía.....	87
IX	Anexos.....	95
9.1	Entrevista Ing. Roberto Lagos, Lazarus & Lazarus Toncontín.....	115
9.2	Entrevista MSc. Ing. Luz Marina Funes, docente FI UNITEC.....	116
9.3	Entrevista Ing. Luis Francisco Perna, Lazarus & Lazarus Suyapa.....	117

## **ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1	Reforzamiento de elemento estructural con fibra de carbono.....	1
Ilustración 2	Fallas y daños en estructuras de concreto.....	8
Ilustración 3	Refuerzo mediante concreto proyectado.....	11
Ilustración 4	Técnicas de rehabilitación   Encamisado de vigas y columnas.....	12

Ilustración 5 Aplicación de CFRP adherido externamente.....	13
Ilustración 6 Proceso de fabricación de los laminados CFRP .....	13
Ilustración 7 Fibra de vidrio. ....	16
Ilustración 8 Kevlar fibra de aramida.....	16
Ilustración 9 Pilar de puente reforzado con AFRP .....	17
Ilustración 10 Polímero reforzado con fibra de carbono.....	18
Ilustración 11 Reforzamiento de Vigas con sistema CFRP (Fibra de Carbono).....	19
Ilustración 12 Reforzamiento estructural con Fibra de Carbono.....	20
Ilustración 13 Fibra de carbono para la construcción .....	24
Ilustración 14 Resina epoxi transparente para fibra de carbono.....	25
Ilustración 15 Adhesivo epoxi estructural para fibra de carbono .....	27
Ilustración 16 Resistencia a la flexión.....	28
Ilustración 17 EBR por flexión.....	29
Ilustración 18 NSMR por flexión.....	30
Ilustración 19 Ensayo a flexión de una pieza de carbono y núcleo de espuma de aluminio ....	31
Ilustración 20 Refuerzo a flexión positiva.....	32
Ilustración 21 Armado de confinamiento.....	34
Ilustración 22 Resistencia al confinamiento con TMR .....	35
Ilustración 23 Confinamiento con fibra de carbono .....	36
Ilustración 24 Método envoltura automatizada por confinamiento.....	37
Ilustración 25 Confinamiento pasivo con FRP .....	38
Ilustración 26 Confinamiento en secciones rectangulares .....	41
Ilustración 27 Refuerzo a confinamiento con fibra de carbono .....	41
Ilustración 28 Refuerzo por confinamiento .....	43
Ilustración 29 Refuerzo a cortante .....	44

Ilustración 30 FRP - EBR por cortante.....	49
Ilustración 31 FRP- NSMR por cortante.....	49
Ilustración 32 Estribos discontinuos para refuerzo por cortante .....	50
Ilustración 33 Chaqueta continua para refuerzo por cortante.....	50
Ilustración 34 Refuerzo a cortante .....	51
Ilustración 35 Reforzamiento por cortante con CFRP.....	52
Ilustración 36 Esquema de especímenes para ensayos a cortante simple y doble.....	52
Ilustración 37 Preparación del soporte para una buena adherencia .....	53
Ilustración 38 Proceso de preparación de los ensayos de adherencia .....	55
Ilustración 39 Preparación correcta de la superficie .....	55
Ilustración 40 Aplicación de la resina epoxi .....	56
Ilustración 41 Colocación laminados CFRP.....	56
Ilustración 42 FIB 2007 .....	57
Ilustración 43 Eurocódigos.....	57
Ilustración 44 ACI 440.3R-04 .....	58
Ilustración 45 Torre Chocavento – Perú .....	59
Ilustración 46 Diseño del refuerzo por cortante y por flexión.....	60
Ilustración 47 Refuerzo a flexión de las columnas de la torre.....	60
Ilustración 48 Refuerzo a Cortante de las columnas de la torre.....	61
Ilustración 49 Tren eléctrico de Lima.....	62
Ilustración 50 Preparación de la superficie.....	62
Ilustración 51 Preimpregnación de las fibras.....	63
Ilustración 52 Colocación de la fibra con la resina Epoxi .....	63
Ilustración 53 Columna circular ya reforzada.....	63
Ilustración 54 Edificio Cube, Alemania .....	64

Ilustración 55 Diseño del edificio Cube.....	65
Ilustración 56 Edificio Laureano .....	65
Ilustración 57 Reforzamiento de las vigas del edificio .....	66
Ilustración 58 3.11.1 SIKA CarboDur Design Software.....	67
Ilustración 59 Pruebas realizadas en el Software .....	68
Ilustración 60 Ficha técnica para uso de macrofibras.....	107
Ilustración 61 Ficha técnica de la aplicación de la macrofibra .....	108
Ilustración 62 Recomendaciones de la ficha técnica.....	109
Ilustración 63 Ficha técnica de la microfibra.....	110
Ilustración 64 Precauciones de la ficha técnica para la microfibra .....	111
Ilustración 65 Epóxico de ADMIX.....	114

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mecánicas típicas de las fibras utilizadas en los FRP.....	14
Tabla 2 Tipología de fibra de carbono.....	79
Tabla 3 Tabla 22.5.5.1 del ACI 318-19.....	95
Tabla 4 Especificaciones técnicas fibra de carbono .....	112
Tabla 5 Especificaciones técnicas "Deformaciones" fibra de carbono.....	113
Tabla 6 Especificaciones técnicas "Barras y Laminados" fibra de carbono .....	113
Tabla 7 Ventajas platina metálica y platina CFRP.....	114
Tabla 8 Datos técnicos adhesivos.....	115

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Resistencia a cortante $V_c$ según ACI 318-19.....	45
Ecuación 2 Resistencia a cortante $V_c$ , b según ACI 318-19.....	45
Ecuación 3 Resistencia a cortante $V_c$ Según ACI 318-19, Tabla 22.5.5.1, Ecuación c).....	46
Ecuación 4 Factorización $\lambda_s$ para considerar la altura del componente según ACI 318-19.....	47

Ecuación 5 Requisitos de la armadura mínima de cortante según ACI 318-19, 9.6.3.1.....	48
--	----

## **ÍNDICE DE GRÁFICAS**

Gráfica 1 Fallas que se deben de evitar.....	9
Gráfica 2 Fallas comunes de las fallas estructurales.....	10
Gráfica 3 Ejemplos de aplicación manual de materiales FRP.....	15
Gráfica 4 Ensayos para la durabilidad del reforzamiento de elementos estructurales.....	21
Gráfica 5 Proceso para determinar la durabilidad de los reforzamientos con CFRP.....	21
Gráfica 6 Documentación del proceso para rehabilitar con CFRP.....	22
Gráfica 7 Pasos para una correcta aplicación de EBR.....	30
Gráfica 8 Por qué es importante el método de envoltura automatizada.....	38
Gráfica 9 Tensiones axiales.....	39
Gráfica 10 Deformación vs Fcc.....	39
Gráfica 11 Carga axial normalizada.....	40
Gráfica 12 pw Efecto en la ecuación b), tabla 22.5.5.1, ACI 318-19.....	46
Gráfica 13 Profundidad eficaz d Influencia en Vc ecuación c), tabla 22.5.5.1 ACI 318-19.....	48
Gráfica 14 Ventajas de los sistemas de adherencia.....	54
Gráfica 15 Herramientas del enfoque.....	69
Gráfica 16 Variables de la investigación.....	70
Gráfica 17 Fuentes primarias utilizadas.....	71
Gráfica 18 Técnicas y herramientas aplicados.....	72
Gráfica 19 Herramientas y sitios utilizados.....	73
Gráfica 20 Entrevistas realizadas.....	73

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1 Tabla 22.5.5.1 del ACI 318-19.....	95
Anexo 2 Evolución de guías y normas para utilizar los FRP.....	95

Anexo 3 Modelos para determinar la longitud efectiva para la adherencia de los FRP.....	96
Anexo 4 Diagrama tensión/deformación concreto -acero-CFRP.....	96
Anexo 5 Asesoría temática 1.....	97
Anexo 6 Asesoría temática 2.....	98
Anexo 7 Asesoría temática 3.....	99
Anexo 8 Asesoría temática 4.....	100
Anexo 9 Asesoría temática 5.....	101
Anexo 10 Asesoría temática 6.....	102
Anexo 11 Asesoría temática 7.....	103
Anexo 12 Asesoría temática 8.....	104
Anexo 13 Asesoría temática 9.....	105
Anexo 14 Asesoría temática 10.....	106
Anexo 15 Ficha técnica Lazarus&Lazarus para uso de macrofibras.....	107
Anexo 16 Ficha técnica de las microfibras de Lazaros & Lazaros.....	110
Anexo 17 Macrofibra de Lazarus&Lazarus.....	111
Anexo 18 Microfibra de Lazarus&Lazarus.....	111
Anexo 19 Esquema de carbonización.....	112
Anexo 20 Especificaciones técnicas fibra de carbono de MBrace.....	112
Anexo 21 Especificaciones técnicas "deformaciones" fibra de carbono de MBrace.....	113
Anexo 22 Especificaciones técnicas "Barras y Laminados" fibra de carbono.....	113
Anexo 23 Ventajas uso de platina metálica y CFRP.....	114
Anexo 24 Adhesivos epóxico entre concreto y elementos metálicos.....	114
Anexo 25 Anexos Datos técnicos adhesivos.....	115
Anexo 26 Entrevistas para investigar el uso de polímeros en Honduras.....	115

## **SIGLAS**

ACE	Asociación de Consultores de Estructuras
ACI	American Concrete Institute (Instituto americano de la construcción)
AFRP	Advanced Fiber Reinforced Polymer
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	Comité Europeo de Normalización
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
CHOC	Código Hondureño de la Construcción
CR	Concreto Reforzado
EBR	Externally Bonded Reinforcement
ELS	Estado Límite de Servicio
FI	Facultad de Ingeniería
FIB	Federación Internacional para el Concreto Reforzado
FRP	Fiber Reinforced Polymer
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
HR	Humedad Relativa
IEE	Instituto de Estudios Estructurales
JCI	Instituto Japones del Concreto
JSCE	Asociación Japonesa de Ingenieros Civiles
LOE	Ley de Ordenación de la Edificación
NSMR	Near Surface Mounted Reinforcement
OCT	Oficina de Control Técnico
RTRI	Instituto Técnico de Investigación de Ferrocarriles
TRM	Textile Reinforced Mortars

## GLOSARIO

**Reforzamiento:** "Aumento de secciones o adición de materiales nuevos que aumenten la capacidad resistente de los elementos estructurales y de la estructura en su conjunto" (Torre, 2019).

**Reparación estructural:** "Intervención sobre fallas y fisuras que intenta restituir las características iniciales de resistencia de la estructura, luego de un evento extraordinario que le provocó daños" (Torre, 2019).

**Fibras 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" (Pedro, 2015).

**Flexión:** "Tiene por objeto incrementar el valor del momento último inicial de la sección de la estructura" (Institut D'estudits estructurals, 2021).

**Cortante:** "Tiene por objeto incrementar la respuesta a esfuerzos cortantes del elemento estructural de concreto reforzado" (Institut D'estudits estructurals, 2021).

**Confinamiento:** "Tiene un doble objeto: a) por una parte mejorar la resistencia a compresión del concreto y b) mejorar la ductilidad del elemento estructural" (Institut D'estudits estructurals, 2021).

**Pasivación:** "Formación de una película relativamente inerte, sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externos" (Tantaleán, 2012).

**Polímeros:** "Del griego: poly 'muchos' y mero 'segmento', son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros" (Tantaleán, 2012).

## I INTRODUCCIÓN

En el contenido de esta investigación se mostrará la revisión bibliográfica sobre reforzamiento de estructuras de concreto reforzado con fibras de carbono y soluciones utilizadas en el Distrito Central como parte de una estrategia integral para fortalecer y prolongar la vida útil de las estructuras de concreto.

EK4, Diseño y Construcción (2021) nos menciona que cada vez más común la identificación de estructuras preexistentes que demandan mejoras en su resistencia y estabilidad. Mientras que en ciertos escenarios la única solución viable implica demoler el elemento afectado o ampliar su sección mediante métodos convencionales, en otras situaciones se presenta como una opción altamente beneficiosa el recurso al diseño y refuerzo mediante sistemas compuestos de fibras de carbono. Este enfoque no solo brinda una alternativa efectiva, sino que también ofrece soluciones innovadoras y duraderas para fortalecer las estructuras de manera eficiente.

Si bien, hay algunos casos en que la única alternativa consiste en reconstruir completamente el elemento, o ampliar su sección por métodos tradicionales, en muchos otros el diseño y reforzamiento con sistemas compuestos de fibras de carbono llega a ser una excelente alternativa (EK4, Diseño y Construcción, 2021).



**Ilustración 1 Reforzamiento de elemento estructural con fibra de carbono**

Fuente: (Sika, 2018)

## **II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En esta sección del trabajo se estructura formalmente la investigación al desarrollar tres elementos: precedentes del problema, preguntas de investigación, justificación y objetivos.

### **2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA**

Según las estadísticas sobre eventos pasados que han causado daños a las estructuras, 5 de cada 10 edificaciones sufre con daños estructurales en el Distrito Central y solo un 40% de todos los edificios en Honduras son a prueba de sismo (Trigueros, 2023).

Los ingenieros estructurales están obligados a evaluar la viabilidad de tres alternativas de diseño para reforzar una estructura de concreto existente en el Distrito Central: polímeros reforzados con fibras de carbono, platinas de fibras de carbono y tejidos de fibras de carbono. Cada alternativa implica el uso de diferentes materiales y cantidades de mano de obra (Trigueros, 2023).

Así mismo, deben determinar cuál de las tres alternativas es la más rentable y efectiva en términos de costos y durabilidad. Además, deben considerar la disponibilidad de materiales y mano de obra en la zona para determinar cuál de las tres alternativas es la más factible para reforzar la estructura de concreto vulnerable (Trigueros, 2023).

Al considerar las alternativas que se han propuesto se pretende realizar un análisis que abarquen aspectos sobre los materiales, mano de obra que se necesitarían para los tres diferentes tipos de usos y aplicaciones, con el propósito de definir la factibilidad de reforzar las estructuras de concreto reforzado del Distrito Central que presentan daño estructural (Trigueros, 2023).

## **2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El problema abordado en esta sección radica en la necesidad de comprender y optimizar el proceso de reforzamiento de estructuras de concreto al utilizar fibras de carbono. Dada la creciente importancia de la infraestructura de concreto en la sociedad moderna, la capacidad de mejorar la resistencia, durabilidad y capacidad de carga de estas estructuras es esencial. El uso de fibras de carbono se ha convertido en una técnica de refuerzo ampliamente reconocida (UPN, 2021).

Sin embargo, aún existen desafíos técnicos y consideraciones críticas que requieren una revisión completa. Esta revisión bibliográfica tiene como objetivo identificar las prácticas más actuales, las investigaciones relevantes y las tendencias emergentes en el reforzamiento de estructuras de concreto con fibras de carbono, con el fin de proporcionar una base sólida para futuras mejoras en esta área (UPN, 2021).

## **2.3 JUSTIFICACIÓN**

El reforzamiento de estructuras de concreto con fibras de carbono es un tema de gran relevancia en el campo de la Ingeniería Civil y la construcción en la actualidad. Esta justificación se basa en varias razones clave que demuestran la importancia de resolver el problema planteado:

Solis (2015) nos afirma que la mejora de la seguridad estructural ya que el reforzamiento de estructuras de concreto con fibras de carbono puede aumentar la resistencia y durabilidad de estas estructuras, lo que a su vez mejora la seguridad para los ocupantes y el público en general también el tema de sostenibilidad y eficiencia con esto la optimización de las técnicas de reforzamiento con fibras de carbono puede contribuir a la prolongación de la vida útil de las estructuras de concreto, lo que reduce la necesidad de demoler y reconstruir, lo que a su vez es beneficioso desde el punto de vista medioambiental y económico.

Otro tema importante es la reducción de costos a largo plazo pues a inversión en técnicas efectivas de reforzamiento puede reducir los costos de mantenimiento a largo plazo, lo que es de interés para los propietarios de infraestructuras y las agencias gubernamentales encargadas de su mantenimiento (Solis, 2015).

La transferencia de conocimiento es una parte importante pues los resultados de esta investigación beneficiarán a ingenieros, arquitectos, constructores y profesionales en el campo de la construcción, al proporcionarles información valiosa sobre cómo mejorar y fortalecer las estructuras de concreto existentes (Solis, 2015).

## **2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿Cuáles son los beneficios clave del refuerzo de estructuras de concreto con fibras de carbono en comparación con otros métodos de refuerzo?
2. ¿Cuáles son las propiedades mecánicas y de durabilidad mejoradas que se pueden lograr mediante el uso de fibras de carbono en el concreto?
3. ¿Cuáles son los métodos de aplicación y técnicas de diseño recomendados para el refuerzo de estructuras de concreto con fibras de carbono?
4. ¿Cuáles son los desafíos y limitaciones asociados con el uso de fibras de carbono en la reparación y refuerzo de estructuras de concreto?
5. ¿Cuáles son las tendencias actuales en la investigación y desarrollo de fibras de carbono para usos en estructuras de concreto?
6. ¿Cuál es el impacto ambiental del uso de fibras de carbono en la construcción y cómo se compara con otras alternativas?

## **2.5 OBJETIVOS**

A continuación, se presentan los objetivos de la investigación.

### **2.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar una revisión bibliográfica completa sobre el reforzamiento de estructuras de concreto con fibras de carbono.

### 2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Investigar las propiedades mecánicas de las fibras de carbono para comprender cómo contribuyen al refuerzo de estructuras de concreto.
2. Analizar las diferentes técnicas y métodos utilizados para aplicar fibras de carbono en estructuras de concreto.
3. Identificar las ventajas y desventajas del uso de fibras de carbono en comparación con otros métodos de refuerzo, como el uso de acero.
4. Explorar casos de éxito a nivel mundial en los que se haya aplicado el refuerzo con fibras de carbono en proyectos de construcción de diversa envergadura.
5. Analizar las normativas y regulaciones relevantes que rigen el uso de fibras de carbono en la construcción y su impacto en los proyectos.
6. Comparar el costo económico y la sostenibilidad ambiental del refuerzo con fibras de carbono en relación con otros materiales de refuerzo.

### 2.5.3 RETOS RELACIONADOS CON LA INVESTIGACIÓN EN EL DISTRITO CENTRAL

1. Investigar los datos sobre el uso de fibras de carbono en proyectos de construcción en Tegucigalpa, Honduras.
2. Evaluar las aplicaciones locales y la aceptación de la tecnología de fibras de carbono en la industria de la construcción en Tegucigalpa.
3. Identificar los desafíos y oportunidades específicos relacionados con el uso de fibras de carbono en proyectos de construcción en esta región.
4. Proporcionar recomendaciones basadas en los hallazgos de la investigación local para mejorar la implementación de fibras de carbono en proyectos de construcción en Tegucigalpa.

### **III MARCO TEÓRICO**

El presente trabajo de investigación se centra en un aspecto importante de la Ingeniería Estructural, el reforzamiento de estructuras de concreto mediante el uso de fibras de carbono. Este tema ha cobrado una importancia creciente debido al potencial para mejorar la resistencia y durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, así como para mitigar los efectos de factores externos, como la corrosión y movimientos sísmicos (Moncayo & Rodriguez, 2016).

El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es llevar a cabo una revisión bibliográfica, con el fin de realizar un análisis sobre las técnicas, métodos, ventajas y limitantes asociadas al reforzamiento de estructuras de concreto reforzado con el uso de fibras de carbono, para dar a conocer el avance del conocimiento en este campo, identificar las tendencias emergentes y resaltar las áreas que requieren mayor investigación (Moncayo & Rodriguez, 2016).

El fundamento teórico de este estudio se basa en los principios de la Ingeniería Estructural, la resistencia de materiales, la ciencia de materiales y la tecnología de construcción. Además, se explorarán conceptos relacionados con la nanotecnología, la química de los materiales compuestos y la mecánica de adherencia, ya que estos desempeñan un papel crucial en la comprensión de cómo las fibras de carbono pueden mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad de las estructuras de concreto (Mauricio, 2003).

Este estudio contribuirá a la gama de conocimientos existentes al cuerpo de conocimientos existentes sobre el reforzamiento con fibras de carbono, de estructuras de concreto reforzado, con el propósito de proporcionar a ingenieros, investigadores y

profesionales de la construcción una serie de principios importantes para la toma de decisiones informadas en proyectos futuros (Moncayo & Rodriguez, 2016).

### **3.1 TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN PARA FALLAS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE CONCRETO**

PYS Concreto (2022) afirman que las fuentes de investigación secundarias han delineado varios enfoques para rehabilitar estructuras de concreto reforzado. Estos métodos han llamado la atención debido a su notable eficacia para mejorar la durabilidad y resistencia de los componentes deteriorados o dañados dentro de estas estructuras.

Además, brindan beneficios adicionales, como menores gastos de mantenimiento a largo plazo y una ejecución menos intrusiva en comparación con los métodos convencionales. La eficacia de estas técnicas se puede atribuir a evidencia científica y experiencia global. Proyectos exitosos sirven como prueba de la capacidad de las fibras de carbono para rehabilitar estructuras de concreto reforzado (PYS Concreto, 2022).

#### **3.1.1 FALLAS ESTRUCTURALES EN ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO**

ASOCRETO (2022) afirma que las fallas en estructuras de concreto se pueden producir por factores externos, calidad de materiales u omisión de detalles en etapas de diseño o construcción o durante su servicio y vida útil. Estas fallas se dividen en 5 categorías las cuales son: Fallas en el diseño, fallas por materiales, fallas por construcción, fallas por operación y por último cierra con las fallas por mantenimiento.

Es sencillo dar por sentado el concreto y cómo nos permite vivir la vida en nuestros paisajes urbanos en evolución, dada la gran cantidad de estructuras de concreto que nos rodean día a día. El concreto debe ser preservado, al igual que nosotros. El estrés y las tensiones de la vida diaria lo afectan (Sika, 2023).

La corrosión, el daño estructural, la infiltración de agua, la actividad sísmica y una variedad de otros factores pueden causar el deterioro del concreto. El deterioro del concreto se debe principalmente a:

- Degradación química, por ejemplo. exposición química: reacciones de agregado alcalino, acción bacteriana.
- Corrosión del acero de refuerzo, por ejemplo: carbonatación, cloruros, corriente eléctrica parásita.
- Ataque mecánico, por ejemplo: impacto, sobrecarga, movimiento, terremoto, explosión.
- Daño físico, por ejemplo: acción de congelación y descongelación, movimientos térmicos, contracción, abrasión, desgaste (Sika, 2023).



**Ilustración 2 Fallas y daños en estructuras de concreto**

Fuente: (Civil, 2021)

Las ejecuciones incorrectas en la construcción de diferentes componentes estructurales, y la ampliación de no ejecutarse de forma adecuada, conlleva a daños que resultan ser

mayores. Se detalla que, si se desea realizar un reforzamiento con la finalidad de lograr una ampliación, se requiere saber cuáles son las fallas más predominantes que se deben evitar, por lo cual, resulta oportuno detallarlas:

			
<p><b>Grietas</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>•Una grieta es algo más serio. Se trata de una abertura profunda que aparece en un muro y que llega a atravesar todo el espesor del mismo.</li></ul>	<p><b>Fisuras</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>•Es una pequeña raja que aparece en los materiales de revestimiento de fachadas, como son el cemento, el yeso o la pintura. Las fisuras delgadas son normales, esto es provocado porque se está asentando al terreno.</li></ul>	<p><b>Asentamiento</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>•Hundimiento de una estructura provocado por los esfuerzos (compresión) en el suelo situado debajo de la misma.</li></ul>	<p><b>Erosión química</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>•se produce en consecuencia de los agentes atmosféricos externos. Al introducirse agua a través de los poros de una edificación, las temperaturas pueden provocar este tipo de erosiones.</li></ul>

**Gráfica 1 Fallas que se deben de evitar**

Elaboración Propia. Fuente: (Yañacc, 2022, pág. 55)

Cruz & Morales (2020) mencionan que las modalidades de fallas estructurales más frecuentes, que se manifiestan en el transcurso de un evento sísmico, presentan una diversidad

de aspectos y siguen una secuencia evolutiva que se inicia con la aparición de defectos localizados, el colapso parcial de elementos estructurales, una degradación gradual que compromete la integridad general del edificio y, en última instancia, un colapso generalizado de la estructura. Conforme avanza el sismo, estas imperfecciones pueden desencadenar el colapso parcial de elementos estructurales.



**Gráfica 2 Fallas comunes de las fallas estructurales**

Elaboración Propia. Fuente: (ASCE 7, 2005)

### 3.1.1 TÉCNICAS DE REHABILITACIÓN CONVENCIONALES

A lo largo de la historia las técnicas convencionales han sido las más utilizadas para las rehabilitaciones de estructuras de concreto armado.

#### 3.1.1.1 Inclusión de nuevos elementos (*Pantallas o muros de fábrica*)

Lemara (2020) afirma que: La Norma UNE-EN 1504, creada por el Comité Técnico CEN/TC 104 Concreto: Prestación, producción, puesta en obra y criterios de conformidad incluye diez documentos que abordan la reparación y protección de estructuras de concreto, sin olvidarse de definir de manera precisa los productos y sistemas más utilizados. En el tercer apartado de la norma europea (UNE EN-1504:3) se menciona el tipo de morteros empleados en la reparación y rehabilitación de estructuras de concreto, la restauración y/o sustitución de concreto defectuoso y la protección de la armadura.

A pesar de los problemas mencionados, el mortero (u concreto) proyectado es una técnica ampliamente utilizada, con cerca de tres cuartos de siglo de existencia, y multitud de aplicaciones en la protección, reparación y refuerzo no sólo de estructuras de concreto sino también de muros de diferentes fábricas, estructuras de madera y metálicas (Lemara, 2020).

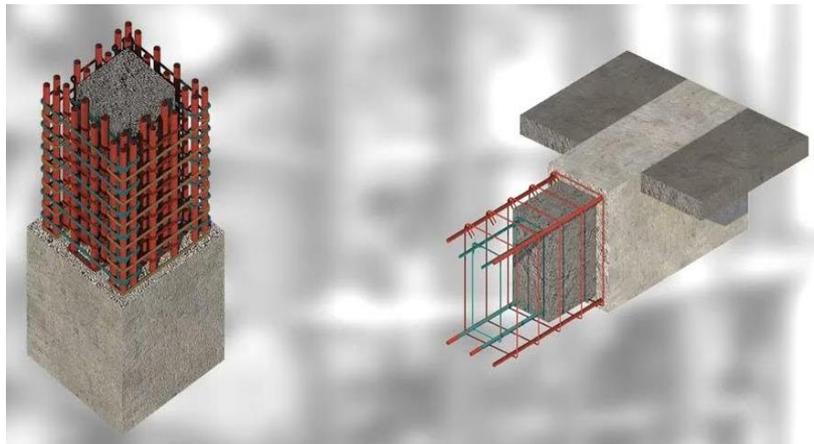


**Ilustración 3 Refuerzo mediante concreto proyectado**

Fuente: (Ribeco, 2015)

### 3.1.1.2 Encamisado (HA, perfiles o placas de acero)

Este es un método para reforzar un elemento estructural que ha sufrido cambios en su capacidad resistente. Envuelve el elemento estructural actual con una sección adicional de concreto convenientemente armado (se aumenta la sección del elemento), reforzándolos frente a compresión, flexión, cortante y torsión, así asegurar el trabajo (Solis, 2015).



**Ilustración 4 Técnicas de rehabilitación | Encamisado de vigas y columnas**

Fuente: (Resiliencia Sísmica, 2022)

## 3.1.2 IMPLEMENTACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS FRP EN REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS

Estas nuevas tecnologías fundamentalmente se usan como refuerzo aplicado externamente y pueden ser:

### 3.1.2.1 Sistemas *in situ*

La técnica conocida como "composición *in situ*" se elabora a base de hojas de fibra en obra a partir de dos componentes principales: fibra y polímero.

1. Fibra en forma de tejido flexible que se adapta a la estructura y se satura con epoxi no curado (componente polimérico).

2. Conforme el epoxi endurece, se forma un compuesto de FRP rígido perfectamente adaptado a la estructura que se adhiere monolíticamente a la misma mediante la resina epoxi (Solis, 2015, pág. 10).



**Ilustración 5 Aplicación de CFRP adherido externamente**

Fuente: (U.S. Department of transportation FHA, 2017)

### 3.1.2.2 *Sistemas pre curados o prefabricados*

Consiste en que los compuestos preformados a base de fibra de carbono, que tienen alta resistencia a la tracción, se adhieran a la superficie. Los laminados con orientación de fibra unidireccional en formato semirrígido se utilizan con frecuencia y requieren requisitos estructurales de bajo módulo elástico LM y alto módulo elástico HM. Ambos tienen resistencias a tracción en rotura similares, pero debido a su rigidez, disminuyen en elongación. La curva de tensión-deformación de la fibra de carbono utilizada es completamente lineal hasta la fractura (Solis, 2015, pág. 11).



**Ilustración 6 Proceso de fabricación de los laminados CFRP**

Fuente: (U.S. Department of transportation FHA, 2017)

## 3.2 POLÍMEROS FRP

Tremco (2007) afirma que la utilización de polímeros en la industria de la construcción sirve para mejorar la durabilidad y las capacidades de sellado de diversos productos. Más allá de su capacidad para mejorar los materiales, los polímeros también desempeñan un papel crucial en la protección de las estructuras de los edificios.

### 3.2.1 POLÍMEROS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN

El propósito de esta sección es describir brevemente las fibras como materiales de refuerzo que se utilizan en la construcción para poder apreciar las ventajas y limitaciones de las fibras que hablamos en este trabajo. Las fibras sintéticas se utilizan principalmente para reforzar plásticos y se dividen en tres tipos:

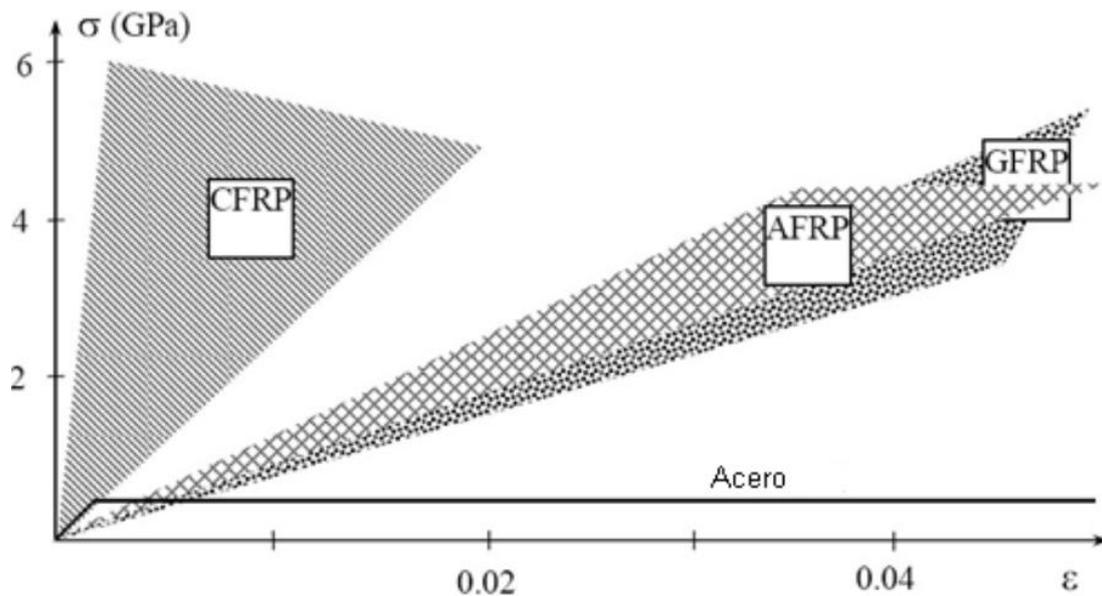
- Fibras de vidrio
- Fibras orgánicas (aramida)
- Fibras de carbono

Existe otro tipo, las fibras metálicas, aunque su uso está más enfocado al refuerzo del concreto como parte de este tipo homogéneo (Ingeniería Mecánica PUCV, 2019).

**Tabla 1 Propiedades mecánicas típicas de las fibras utilizadas en los FRP**

Material	Modulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación última a la tensión (%)
<b>Carbono</b>			
Alta resistencia	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Ultra alta resistencia	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Alto módulo	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Ultra alto módulo	500-700	2100-2400	0,2-0,4
<b>Vidrio</b>			
E	70	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5
<b>Aramida</b>			
Bajo módulo	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Alto módulo	115-130	3500-4000	2,5-3,5

Fuente: (Externally bonded FRP Reinforcemen for RC structures., 2001), (Feldman, 1989)



**Gráfica 3 Ejemplos de aplicación manual de materiales FRP**

Fuente: (PITRA, 2010), (Externally bonded FRP Reinforcemen for RC structures., 2001)

Con el objetivo de facilitar la comprensión de las diferencias en resistencia entre los polímeros reforzados con fibras, la Gráfica 3 presenta una comparación de las curvas esfuerzo-deformación de materiales FRP fabricados con los tres tipos de fibras mencionados previamente, junto con la curva característica del acero estructural. Se evidencia claramente la significativa resistencia proporcionada por los materiales FRP que utilizan fibras de carbono (CRFP) en contraste con los materiales basados en fibras de aramida o vidrio, así como con el acero estructural estándar (Externally bonded FRP Reinforcemen for RC structures., 2001).

### 3.2.1.1 Fibra de vidrio (GFRP)

Este tipo de fibra conocido como GFRP por sus siglas en inglés (Glass Fiber Reinforced Polymer) "tiene la propiedad de ser un material fibroso obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos que al pasar a un estado sólido posee la flexibilidad necesaria para ser empleada como fibra" (Rougier, 2003, P.24).

Este sistema de reforzamiento innovador tiene algunas ventajas como ser la alta resistencia a la flexión, el bajo coste y el excelente aislante térmico que es, pero en sus contras esta que tiene baja resistencia a la tracción (Sika Building Trust, 2018).

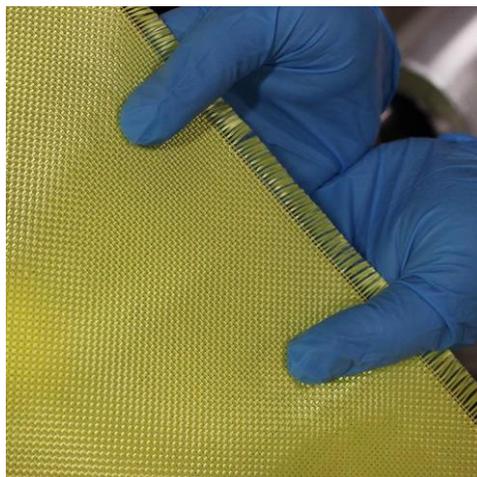


**Ilustración 7 Fibra de vidrio.**

Fuente: (Mexican Fibers S.A de C.V., 2020)

### 3.2.1.2 *Fibras orgánicas (aramida) (AFRP)*

Las fibras orgánicas más comunes en el mercado son las fibras de aramida, que es el nombre genérico de fibras de poliamida aromática. Las fibras de aramida fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont bajo el nombre comercial de Kevlar y en la actualidad hay dos tipos comerciales: Kevlar 29 y Kevlar49 (Avilés, 2002).



**Ilustración 8 Kevlar fibra de aramida**

Fuente: (FibreGlast, 2022)

El Kevlar 29 tiene una densidad baja y alta resistencia aportada por las fibras de aramida, y está diseñado para aplicaciones como protección balística, cuerdas y cables. El Kevlar 49 tiene baja densidad, alta resistencia y módulo elástico y se utiliza en aplicaciones aeroespaciales, en marina, automoción y otras aplicaciones industriales (Avilés, 2002).

Los compuestos de fibra de poliamida aromática tienen las siguientes características: alta resistencia a la tracción, baja densidad específica (alrededor del 25% de la barra de acero), buena resistencia a la corrosión, Alto Módulo elástico, buena resistencia al magnetismo, alta resistencia a la cizalla y alta resistencia a la extrusión (Shanghai Tanchain New Material Technology , 09).

La fibra aramida es una especie de fibra de poliamida aromática. La estructura molecular de la fibra aramida es un polímero, que contiene tanto la cadena principal alifática como la cadena principal aromática (Shanghai Tanchain New Material Technology , 09).

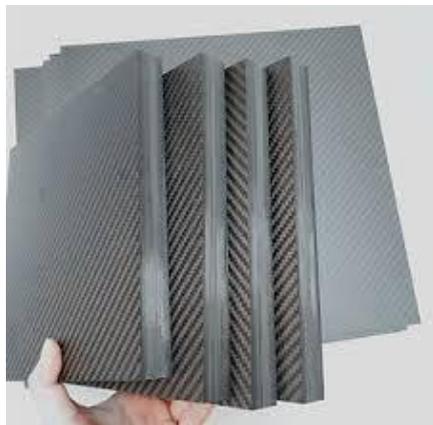


**Ilustración 9 Pilar de puente reforzado con AFRP**

Fuente: (Institute, International Technology Research, 1998)

### 3.2.1.3 Fibra de carbono CFRP

TJ Reinhart et al. (1987) afirma que la fibra de carbono es uno de los materiales compuestos más prometedores para el futuro de la construcción. Este polímero, que se compone de filamentos largos y finos de átomos de carbono unidos en una formación de crista, es más liviano que el acero, cinco veces más resistente y el doble de rígido que el acero. Esto lo hace muy popular entre los fabricantes, quienes unen los filamentos y los trenzan como si fueran lana para hacer tejidos o los moldean en su forma final.



**Ilustración 10 Polímero reforzado con fibra de carbono**

Fuente: (ACEN International Company Limited, 2016)

Cuando coloquialmente se habla de “fibra de carbono”, generalmente nos referimos al material compuesto reforzado con fibras de carbono, y no a las propias fibras de carbono que físicamente forman el reforzante del material (TJ Reinhart et al., 1987).

La estructura de este material compuesto lo forma un conjunto entretrejido de fibras de carbono, que actúan como fase reforzante, el cual se encuentra embebido en una matriz, polímero de resina epoxi, que actúa como fase de soporte y da forma al conjunto general que forma el material (TJ Reinhart et al., 1987).

Kim (2018) establece: “La fibra de carbono y otros materiales compuestos son de alto rendimiento, lo que significa que pesan muy poco, pero pueden soportar muchísimo peso”.



**Ilustración 11 Reforzamiento de Vigas con sistema CFRP (Fibra de Carbono)**

Fuente: (BRS&BM Ingenieros, 2020)

### **3.3 FIBRA DE CARBONO COMO REFUERZO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

La utilización de fibra de carbono como refuerzo para elementos estructurales de concreto armado es una práctica cada vez más común en la Ingeniería Civil y la construcción. Se refiere a la incorporación de láminas o telas hechas de fibra de carbono en elementos de concreto armado, como vigas, columnas o losas, con el propósito de mejorar su resistencia, durabilidad y capacidad para soportar cargas (Institut D'estudits estructurals, 2021).

#### **3.3.1 REFUERZOS CON FIBRAS DE CARBONO**

Handbook, Department of Defense (2002) describen que, a principios de la década de 1950, los norteamericanos se sintieron intrigados por las fibras de carbono como una solución potencial para fortalecer los materiales compuestos estructurales. Estas fibras fueron reconocidas como una opción ideal para el refuerzo de compuestos de fibra de carbono.

La fabricación de estas fibras se inició con el proceso de carbonización de rayones sintéticos procedentes de la industria textil, cuyo principal objetivo era la producción de misiles con buenas propiedades a altas temperaturas, sin embargo, durante el proceso de fabricación, los norteamericanos se percataron de que si, durante el carbonizado, sometían a los rayones sintéticos a temperaturas más altas y durante un periodo de

tiempo más largo, las fibras obtenidas eran ligeramente distintas (Handbook, Department of Defense, 2002).

Esto supuso la primera distinción en cuanto a la fabricación de fibras de refuerzo basadas en el carbono, obteniéndose fibras de carbono o fibras de grafito (Handbook, Department of Defense, 2002).



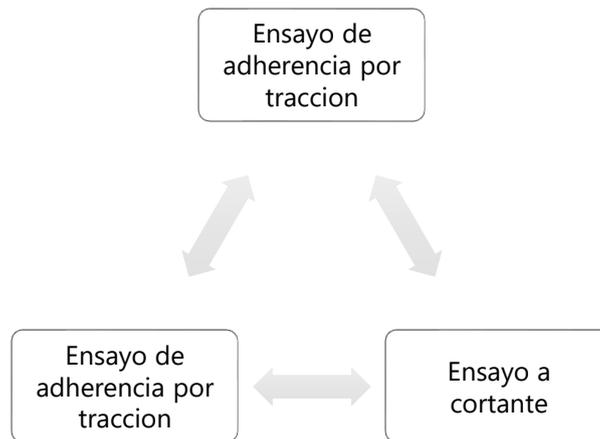
**Ilustración 12 Reforzamiento estructural con Fibra de Carbono**

Fuente: (ANCLAF, 2020)

Al someter a los rayones a temperaturas moderadas durante un periodo de tiempo moderado, se consiguen fibras de carbono, cuya ordenación era preferentemente bidimensional. Sin embargo, si las temperaturas y tiempos de exposición se elevaban, las fibras obtenidas eran de grafito, cuya ordenación era preferentemente tridimensional, pero cuyo enlace entre capas bidimensionales era muy débil. Por ello, se centró la producción en las fibras de carbono, las más comunes hoy en día, a pesar de que las fibras de grafito también se utilizan en otras aplicaciones, pero en menor porcentaje (Handbook, Department of Defense, 2002).

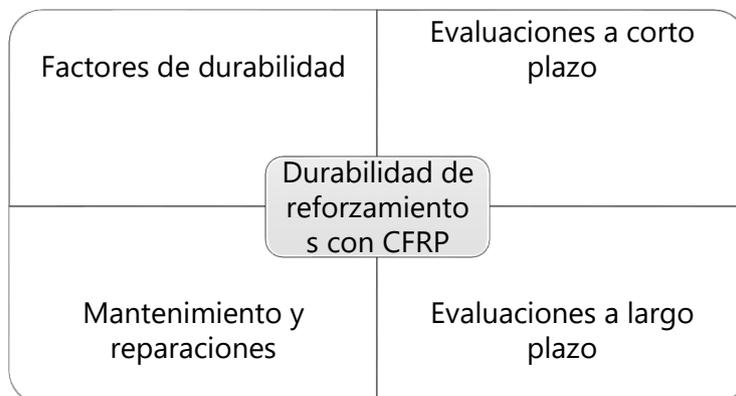
### 3.3.2 DURABILIDAD DEL REFORZAMIENTO

En cuanto a la durabilidad de los refuerzos estructurales de fibra con carbono, estos garantizan la no oxidación, así como la estabilidad durante el paso del tiempo siempre y cuando las condiciones ambientales no sean agresivas (Lemara, 2018).



**Gráfica 4 Ensayos para la durabilidad del reforzamiento de elementos estructurales**

Elaboración Propia. Fuente: (Lemara, 2018)



**Gráfica 5 Proceso para determinar la durabilidad de los reforzamientos con CFRP**

Elaboración Propia. Fuente: (Solis, 2015)

Los sistemas de refuerzo estructural que brindan rendimiento y confiabilidad excepcionales incorporan polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). Estas soluciones innovadoras consisten en placas y varillas de CFRP, así como adhesivos estructurales que utilizan resinas epoxi (Sika Building Trust, 2018).

Estos sistemas se aplican extensamente para reforzar la capacidad de flexión en edificaciones sometidas tanto a cargas dinámicas como estáticas, así como en otras estructuras como puentes, vigas, techos y paredes. Esto contribuye a una durabilidad excepcional a largo plazo durante el servicio (Sika Building Trust, 2018).

Los productos y sistemas que se utilizan deben cumplir con los requisitos mínimos exigidos, comportamiento resistente, durabilidad, reológico, etc., especificados en las normas de cumplimiento obligatorio (UNE-EN 1504). El control de calidad, la inspección y el control de ejecución del refuerzo garantizan su validez y aceptación (Institut D'estudits estructurals, 2021).

El diseño de refuerzo debe tener en cuenta todas las situaciones posibles y la combinación de cargas, verificando todos los estados límites a partir del refuerzo de una sección existente. La sección mixta creará una nueva capacidad resistente que será capaz de resistir los rasantes creados y los modos de fallas por despegue que puedan surgir (Institut D'estudits estructurals, 2021).



**Gráfica 6 Documentación del proceso para rehabilitar con CFRP**

Elaboración Propia. Fuente: (Solis, 2015)

### **3.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA FIBRA DE CARBONO**

Las propiedades mecánicas de un material afectan su resistencia mecánica y capacidad cuando se aplica una fuerza. Por lo tanto, las propiedades mecánicas de un material se refieren a su capacidad para transmitir y resistir fuerzas o deformaciones. (INFINITIA, 2023, pág. 1).

#### **3.4.1 COMPORTAMIENTO A LA TRACCIÓN**

Solis (2015) nos menciona que antes de la fractura, las fibras de carbono no muestran ningún comportamiento plástico; en cambio, su comportamiento se caracteriza por una relación de tensión y deformación elástica lineal hasta la fractura, que suele ser abrupta. El valor del módulo elástico suele estar entre 220 y 240 GPa y la resistencia final oscila entre 2050 y 3790 GPa. El comportamiento elástico de los laminados reforzados con fibras de carbono es lineal y depende del porcentaje de fibras. Los laminados con un volumen de fibras de 40 a 60% tienen un módulo elástico de 100 a 165 GPa y una resistencia final de 1100 a 2200 MPa.

#### **3.4.2 COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN**

Solis (2015) menciona que la resistencia a compresión es menor que la resistencia a tracción en los laminados de FRP utilizados para reparar estructuras de concreto, según investigaciones realizadas en este. El modo de falla de los laminados de fibra de carbono sujetos a compresión longitudinal puede incluir fallas por tensión transversal, fallas por micro pandeo de fibras o fallas por cortante; se han reportado resistencias a compresión que representan aproximadamente el 78% de la resistencia a tracción.

El módulo de elasticidad a compresión es menor que el módulo elástico a tracción, en ensayos se han determinado módulos del orden de 85% del módulo elástico a tracción en laminados con un porcentaje de fibras de entre 55 – 60% (Solis, 2015, pág. 13).

### **3.5 MATERIALES PARA REFORZAR ESTRUCTURAS CON FIBRA DE CARBONO**

Estos son los materiales necesarios para que una estructura pueda ser reforzada con las fibras de carbono.

#### **3.5.1 FIBRAS DE CARBONO**

En la actualidad, los laminados son esenciales en las labores de rehabilitación. El refuerzo de estructuras de concreto reforzado con laminados de fibra de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés) es una de las tecnologías más prometedoras debido a sus buenas características mecánicas y su facilidad de manipulación (Solis, 2015, pág. 13).

En el mercado están disponibles las láminas de fibras de carbono de 0,50 m de espesor por longitud variable, de acuerdo con el requerimiento del diseño. Las fibras de carbono en la lámina vienen alineadas en una sola dirección, dirección en la que se provee la resistencia adicional (Kustom service, 2018).

Por ejemplo, en el caso del refuerzo de una losa aligerada cuya resistencia se desea aumentar, se disponen tiras de fibras debajo de las viguetas, en el número de capas necesario. En una losa armada en dos sentidos, se pueden disponer franjas en ambas direcciones (Kustom service, 2018).



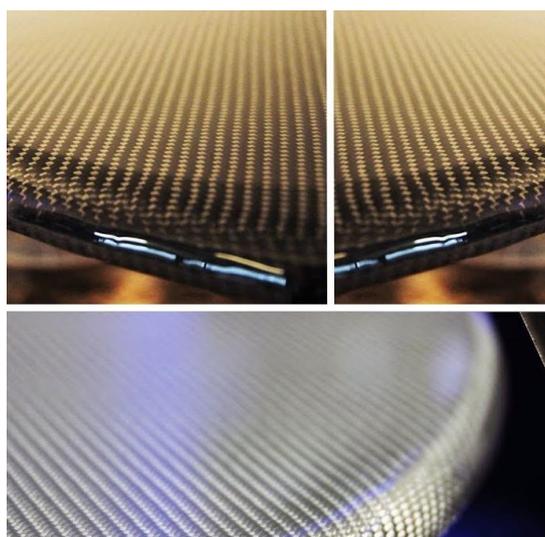
**Ilustración 13 Fibra de carbono para la construcción**

Fuente: (Sika Building Trust, 2018)

### 3.5.2 RESINA EPOXI

La resina epoxi se utiliza para impregnar las fibras de carbono y crear una unión fuerte con la estructura existente. Es importante elegir una resina de alta calidad adecuada para la aplicación específica del tipo de reforzamiento para la estructura de concreto (Kustom service, 2018).

Resina epoxi de dos componentes para fundición e impregnación de fibra de carbono, es un producto específico con catalizador rápido que permite el secado al tacto en 24 horas a una temperatura de 18/20 grados centígrados. El catalizador rápido sólo permite piezas fundidas máximas de 1 cm a 1,5 cm en función de la masa total (Kustom service, 2018).



**Ilustración 14 Resina epoxi transparente para fibra de carbono**

Fuente: (Kustom service, 2018)

Sobre la superficie imprimada previamente, se aplica una capa de resina epoxi de impregnación, guiándose de las instrucciones detalladas en la ficha técnica correspondiente.

### 3.5.3 CUCHILLAS Y TIJERAS

Para cortar las fibras de carbono según las formas necesarias y para realizar ajustes durante la instalación.

Se realiza una medición y corte de las tiras de tejido de acuerdo con los planes de trabajo establecidos. Las tiras de tejido cortado se marcarán y almacenarán en un lugar libre de polvo y sin posibilidad de exposición al agua. Es importante evitar doblar el tejido para no dañar las fibras (Institut D'estudits estructurals, 2021).

#### 3.5.4 GUANTES Y EQUIPO DE PROTECCIÓN

Es esencial usar guantes y otros equipos de protección personal al manipular resinas y fibras de carbono para evitar irritaciones en la piel.

#### 3.5.5 HERRAMIENTAS DE PREPARACIÓN DE SUPERFICIE

Depende del tipo de superficie a reforzar, es posible que necesites herramientas para limpiar, lijar o preparar la superficie antes de aplicar las fibras de carbono.

#### 3.5.6 CAPAS SEPARADORAS Y MATERIALES DE LIBERACIÓN

Para evitar que la resina se adhiera a las superficies no deseadas durante el proceso de curado.

#### 3.5.7 SELLADORES Y ADHESIVOS ADICIONALES

Pueden ser necesarios para abordar áreas específicas que requieran refuerzo adicional.

Sobre la base preparada, que debe estar limpia, seca, firme, rugosa y libre de cualquier contaminante, aceite u otra sustancia, se lleva a cabo la aplicación del sistema completo en dos o más fases, según el diseño. Para la colocación de los laminados de PRF suministrados, se utilizan adhesivos epoxi sin disolventes en forma de dos componentes predosificados: resina epoxi y endurecedor con una relación de mezcla específica (Institut D'estudits estructurals, 2021).



**Ilustración 15 Adhesivo epoxi estructural para fibra de carbono**

Fuente: (Klebstoff, 2022)

Ambos componentes deben mezclarse minuciosamente, se debe de seguir estrictamente las instrucciones del fabricante, en un recipiente limpio en la cantidad necesaria para aplicar la mezcla sin que esta endurezca en el recipiente. La mezcla se realizará mediante una batidora eléctrica de bajas revoluciones, se debe de seguir el tiempo de mezclado indicado en la ficha técnica del fabricante (Institut D'estudits estructurals, 2021).

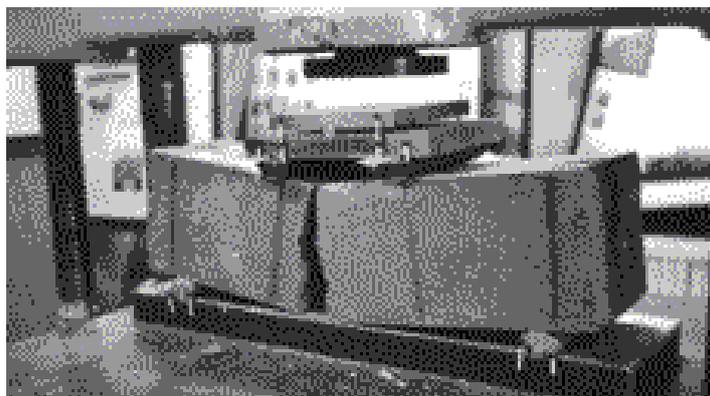
### **3.6 REFUERZO POR FLEXIÓN DE LA FIBRA DE CARBONO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

Moncayo & Rodriguez (2016) nos menciona que se ha demostrado que el uso de fibras de carbono para el refuerzo de flexión mejora la resistencia a la flexión de los componentes de concreto reforzado, como losas y vigas, y soluciona problemas como la pérdida de capacidad de carga. Por lo tanto, este método no puede ser subestimado.

Moncayo & Rodriguez (2016) afirma que además es un método que abarca menos espacio que los métodos convencionales, lo que podría reducir las interrupciones y los gastos a largo plazo de nuestro trabajo de restauración. La técnica es válida para reforzar elementos de concreto reforzado sometidos a cargas de flexión, como lo demuestra su sólida base técnica y su amplia aplicación en proyectos comparables.

### 3.6.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Masias-Mogollon (2018) menciona que la resistencia a la flexión puede considerarse una valiosa medida indirecta de la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción. En términos más simples, se trata de la capacidad del concreto para soportar tensiones aplicadas a lo largo de una viga o losa sin refuerzo adicional. Esta propiedad es de suma importancia en la evaluación de la calidad del concreto utilizado en pavimentos, ya que los pavimentos de concreto están sometidos a una serie de tensiones y esfuerzos a lo largo de su vida útil. Esto incluye la carga impuesta por vehículos que transitan sobre la superficie, así como las fluctuaciones de temperatura que pueden causar expansiones y contracciones. La resistencia a la flexión es un factor determinante para garantizar la durabilidad y la integridad estructural de estas estructuras.



**Ilustración 16 Resistencia a la flexión**

Fuente: (Constructor Civil, 2011)

Depaz (2019) menciona que las edificaciones, a lo largo de su ciclo de vida, suelen experimentar múltiples modificaciones debidas a una serie de factores, ya sean influencias externas como incremento de cargas o variaciones en las condiciones ambientales, o el desgaste intrínseco que afecta su integridad con el tiempo. Por este motivo, resulta imperativo llevar a cabo una minuciosa evaluación de reforzamiento estructural.

Depaz (2019) afirma que, en este contexto, se emplean diversas técnicas y enfoques con el propósito primordial de restablecer o mejorar la capacidad de resistencia de los elementos estructurales y con así asegura que estos puedan satisfacer las exigencias de carga a las que se ven sometidos de manera efectiva y segura a lo largo de su vida útil.

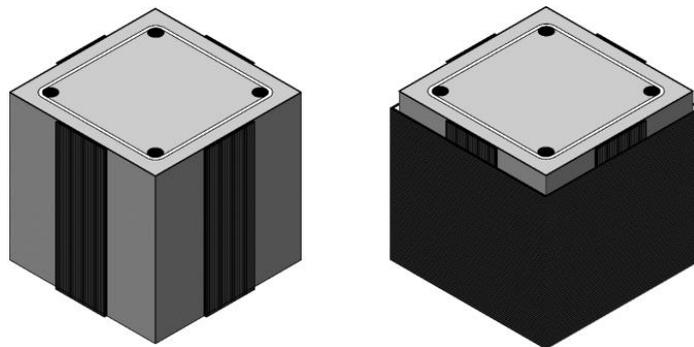
El encamisado de concreto tiene como objetivo principal el incrementar la capacidad a esfuerzos del elemento a través de un ensanche de las dimensiones de la sección transversal (Depaz, 2019, pág. 31).

Al momento de diseñar a flexión debe verificarse que el momento a flexión de diseño sea mayor que el momento a flexión requerido. La resistencia a flexión de diseño hace referencia a la resistencia nominal del elemento estructural multiplicado por un factor de reducción, mientras que la resistencia a flexión requerido,  $M_u$ , está vinculada a los efectos de cargas mayoradas (Beltran, 2011, pág. 40).

### 3.6.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE LA FIBRA DE CARBONO

Existen distintas técnicas de rehabilitación mediante la resistencia a la flexión de la fibra de carbono las cuales son:

- FRP - EBR (Externally Bonded Reinforcement or Plate Bonding por sus siglas en ingles)



**Ilustración 17 EBR por flexión**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

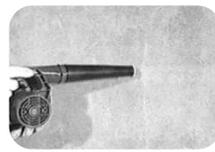
Existe una serie de pasos que son los que se tienen que seguir para que la técnica EBR logre alcanzar la resistencia que se pretende.



Reparar el concreto



Desbaratar el concreto



Comprobar que no haya desniveles



Limpiar la FRP



Mezclar el adhesivo



Aplicación de adhesivo sobre concreto



Aplicación de adhesivo sobre FRP



Pegado de la placa



Asegúrese de que no haya burbujas de aire.

### Gráfica 7 Pasos para una correcta aplicación de EBR

- FRP - NSMR (Near Surface Mounted Reinforcement por sus siglas en ingles)

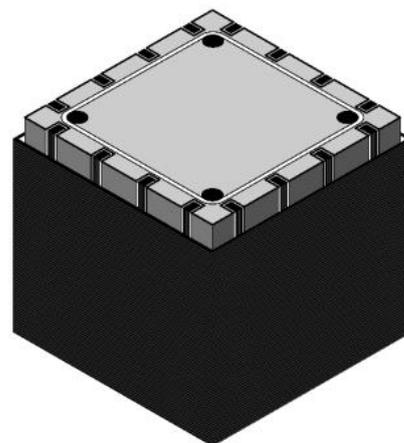
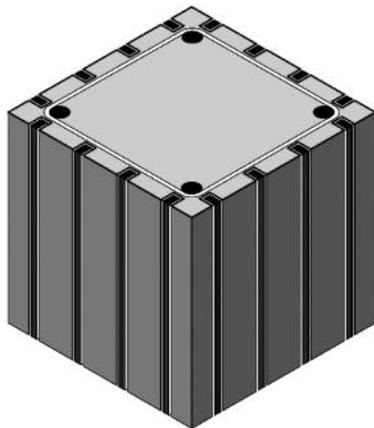


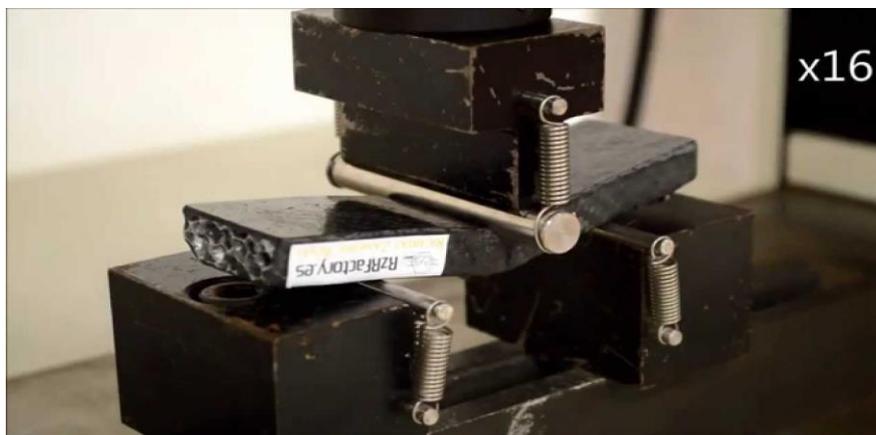
Ilustración 18 NSMR por flexión

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

(Institut D'estudits estructurals, 2021) afirma que los sistemas con laminados de fibra de carbono se utilizan principalmente para refuerzos a flexión de vigas y losas. Esto se hace adhiriéndose externamente al elemento en la zona de momentos positivos y negativos para aumentar su resistencia a la flexión, lo que es muy similar a la situación de una sección de

concreto estructural. La diferencia más notable es la incorporación de un nuevo componente resistente, que siempre se encuentra en la zona de tracción.

(Institut D'estudis estructurals, 2021) mencionan que su dimensionado se basa en la sección transversal y en los parámetros resistentes del material compuesto (fibra más matriz). Además, es importante estar familiarizado con las leyes de esfuerzo que deben soportar la estructura, así como con las resistencias de los materiales involucrados como el concreto y acero.



**Ilustración 19 Ensayo a flexión de una pieza de carbono y núcleo de espuma de aluminio**

Fuente: (Zamora, 2014)

Beltran (2011) describe que, en la actualidad, el sistema de reforzamiento con fibras de carbono es un método de reforzamiento estructural muy importante porque es fácil y rápido de instalar y está hecho de láminas y telas de alta resistencia que se adhieren con resina epóxica. Esto lo hace muy eficiente porque aumenta la resistencia del elemento reforzado a la flexión, cortante, torsión y actualización sísmica, dependiendo de la configuración del sistema.

Este sistema con fibra de carbono se puede emplear en cualquier elemento estructural de concreto reforzado (vigas rectangulares, vigas "T", vigas "I", columnas cuadradas, columnas circulares, estribos, muros, etc.), para aumentar su capacidad a flexión,

cortante, torsión y confinamiento; de acuerdo con las solicitaciones de la estructura (Beltran, 2011, pág. 58)

Flores (2012) afirma que cada vez más se introduce en nuestro medio un sistema de reforzamiento estructural basado en nuevos materiales de alta tecnología que presenta innumerables ventajas frente a los métodos convencionales: la fibra de carbono, un polímero 10 veces más resistente a la tracción que el acero convencional (35,500 kg/cm<sup>2</sup> vs. 4,200 kg/cm<sup>2</sup>) y mucho más liviano.



**Ilustración 20 Refuerzo a flexión positiva**

Fuente: (Institut D'estudits estructurals, 2021)

Flores (2012) afirma que, entre las múltiples alternativas de refuerzo disponibles en nuestro entorno, el método que ha ganado mayor aceptación debido a sus ventajas innegables es el empleo de láminas de fibras de carbono. Este sistema implica la aplicación de una o varias capas de láminas alrededor o debajo de las secciones de concreto que necesitan refuerzo. Estas láminas se adhieren de manera integral a la superficie de concreto existente mediante el uso de un adhesivo epóxico especializado.

Flores (2012) afirma que, el resultado es la creación de una capa externa de refuerzo que contribuye a la capacidad de carga del elemento estructural y previene desviaciones excesivas. Este procedimiento se caracteriza además por su rápida implementación y su relativo bajo costo, sin quitar un sistema excepcional basado en materiales de alta resistencia. Estos materiales poseen una relación destacada entre rigidez y peso, y exhiben una notable resistencia a los daños ocasionados por sustancias químicas corrosivas.

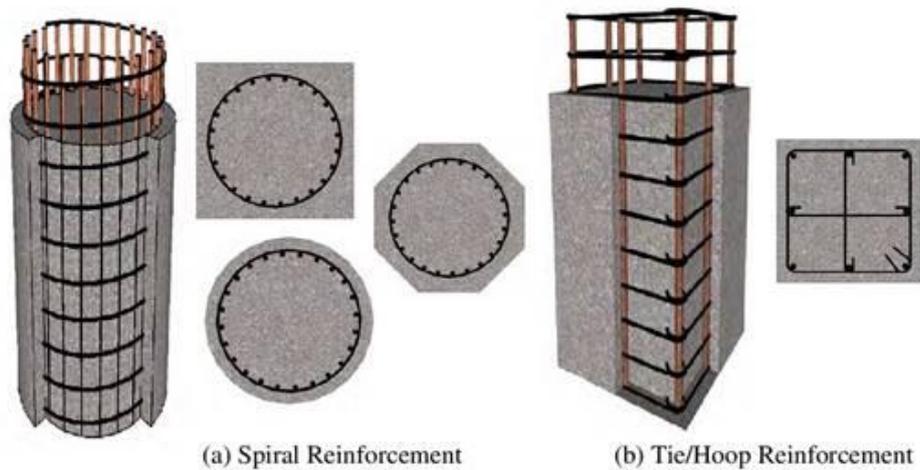
### **3.7 REFUERZO POR CONFINAMIENTO CON FIBRA DE CARBONO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

El uso de fibras de carbono para reforzar el confinamiento es un desarrollo particularmente significativo que proporciona un método probado para mejorar la resistencia y el confinamiento de pilares y columnas de concreto reforzado. Esta técnica es capaz de abordar los desafíos típicos asociados con la capacidad de carga y la seguridad estructural. Su confiabilidad proviene de sus sólidos fundamentos técnicos.

#### **3.7.1 RESISTENCIA AL CONFINAMIENTO**

Moncayo & Rodriguez (2016) afirman que La fibra de carbono se perfila como un recurso de notable utilidad para reforzar estructuras sometidas a tensiones significativas. Este material se destaca por su impresionante resistencia, su facilidad de instalación, y su capacidad intrínseca, que supera incluso la del acero, para resistir esfuerzos de tensión.

Moncayo & Rodriguez (2016) mencionan que, no obstante, sus usos no se limitan únicamente a la mejora de la resistencia a la tensión, ya que la fibra de carbono desempeña un papel crucial al proporcionar un confinamiento efectivo, lo que contribuye a fortalecer y estabilizar el material en cuestión, y así ofrecer un conjunto integral de ventajas en el campo del reforzamiento estructural.



**Ilustración 21 Armado de confinamiento**

Fuente: (Aceros Arequipa, 2017)

La fibra de carbono tiene sus ventajas como ser, mejora la resistencia a los impactos, la resistencia al fuego y el aislamiento térmico. La resistencia aumenta la capacidad de los elementos compuestos para soportar esfuerzos de tensión y confinamiento. (Moncayo & Rodriguez, 2016).

La fibra de carbono puede usarse para reforzar las vigas, restaurar su capacidad a la tensión y aumentar o reparar el confinamiento. En caso de que las varillas de acero se deterioren mucho, las vigas se pueden usar en tiras para ayudar a absorber el esfuerzo de tensión (Moncayo & Rodriguez, 2016).

En las columnas, se considera una mejor disposición la colocación de un encamisado con fibra de carbono, y con esto ayuda a restaurar su capacidad para resistir esfuerzos de tensión cuando el acero ha dejado de ejercer su función y aumenta el confinamiento (Moncayo & Rodriguez, 2016).

El confinamiento se aplica generalmente a los miembros de compresión, para mejorar su capacidad de carga o, en casos de modernización sísmica, para aumentar su ductilidad. Las técnicas tradicionales de confinamiento confían en los estribos de acero,

encamisados de acero o CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono) para su reforzamiento. En problemas sísmicos, existen mejoras técnicas (ya sea de fortalecimiento o de refuerzo), basadas en el aumento de la presión de confinamiento (Colque, 2020, pág. 3).

### *3.7.1.1 Confinement con TRM (Textile Reinforced Mortars por sus siglas en ingles)*

Esta investigación destaca los aspectos del refuerzo rendimiento de la malla textil unida por una matriz cementosa y la importancia de los parámetros que deben considerarse en las pautas de diseño y aplicaciones de campo. El uso de TRM en el refuerzo a cortante de vigas de concreto reforzado deficiente limita la propagación de grietas en el tramo crítico y, por lo tanto, aumenta la capacidad de corte y deformabilidad de las vigas (FIB Bulletin N° 90).



**Ilustración 22 Resistencia al confinamiento con TMR**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

El confinamiento de los miembros de compresión resulta en ductilidad y resistencia considerablemente mayores en escenarios sísmicos axiales y simulados (FIB Bulletin N° 90).

El fortalecimiento sísmico de los marcos de concreto reforzado utilizando TRM conduce a importantes mejoras en la ductilidad y disipación de energía y, en menor grado, en la rigidez y mejoras de fuerza (FIB Bulletin N° 90).

### 3.7.2 RESISTENCIA AL CONFINAMIENTO DE LA FIBRA DE CARBONO

Institut D'estudis estructurals (2021) afirma que el refuerzo de pilares, silos y depósitos se utiliza principalmente para realizar refuerzos de estructuras mediante la utilización de técnicas específicas el efecto del confinamiento. Mediante el uso de tejido de fibra de carbono en dirección perpendicular al esfuerzo de compresión, es posible realizar un zunchado transversal del elemento.



**Ilustración 23 Confinamiento con fibra de carbono**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

La capacidad de la fibra de carbono para mantener su integridad y propiedades mecánicas bajo cargas de compresión o confinamiento se conoce como resistencia al confinamiento (Sika, 2018).

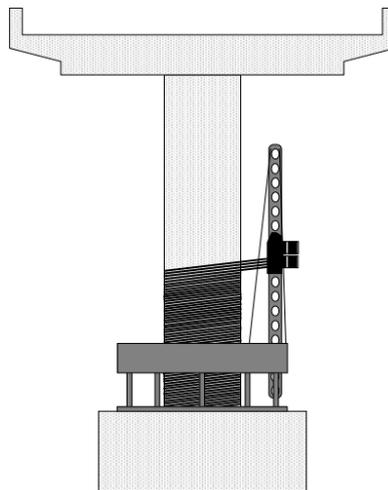
Díaz (2016) afirma que el confinamiento del concreto con materiales compuestos con fibras (FRP), que se consideran materiales elásticos hasta la rotura, es diferente. En los primeros

estados de carga hasta que el FRP alcanza el 2%, su comportamiento es muy similar al del acero debido a su rigidez parecida.

Es importante conocer las diferentes técnicas o maneras de aplicar la fibra de carbono para la resistencia al confinamiento, estas son las siguientes:

### 3.7.2.1 *Envoltura automatizada*

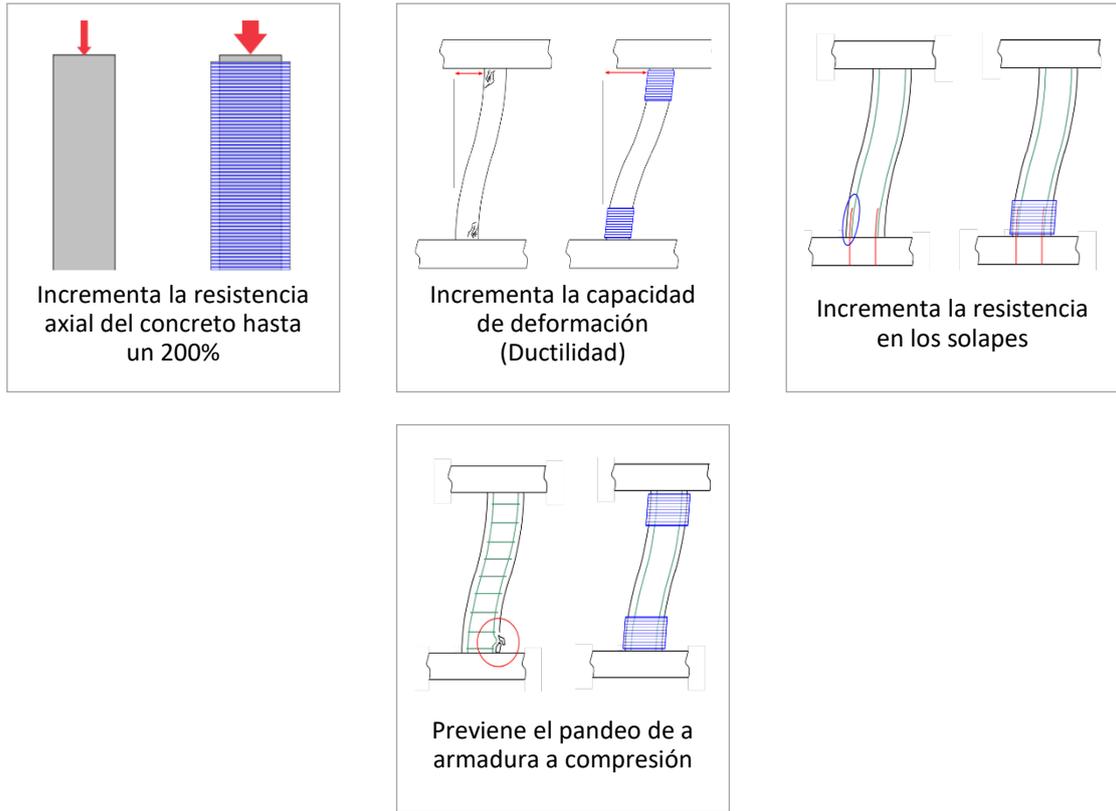
Existe el método de la envoltura automatizada es el proceso de aplicación de materiales compuestos de fibra de carbono alrededor de elementos estructurales, como columnas o pilares, con el objetivo de mejorar su resistencia y capacidad de carga como se muestra en la Ilustración 24.



**Ilustración 24 Método envoltura automatizada por confinamiento**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

Este método recobra importancia al explicar para qué se usa en la construcción, la explicación se detalla en la siguiente gráfica:

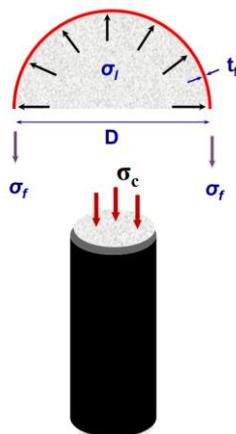


**Gráfica 8 Por qué es importante el método de envoltura automatizada**

Elaboración Propia. Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

### 3.7.2.2 Confinamiento pasivo con FRP

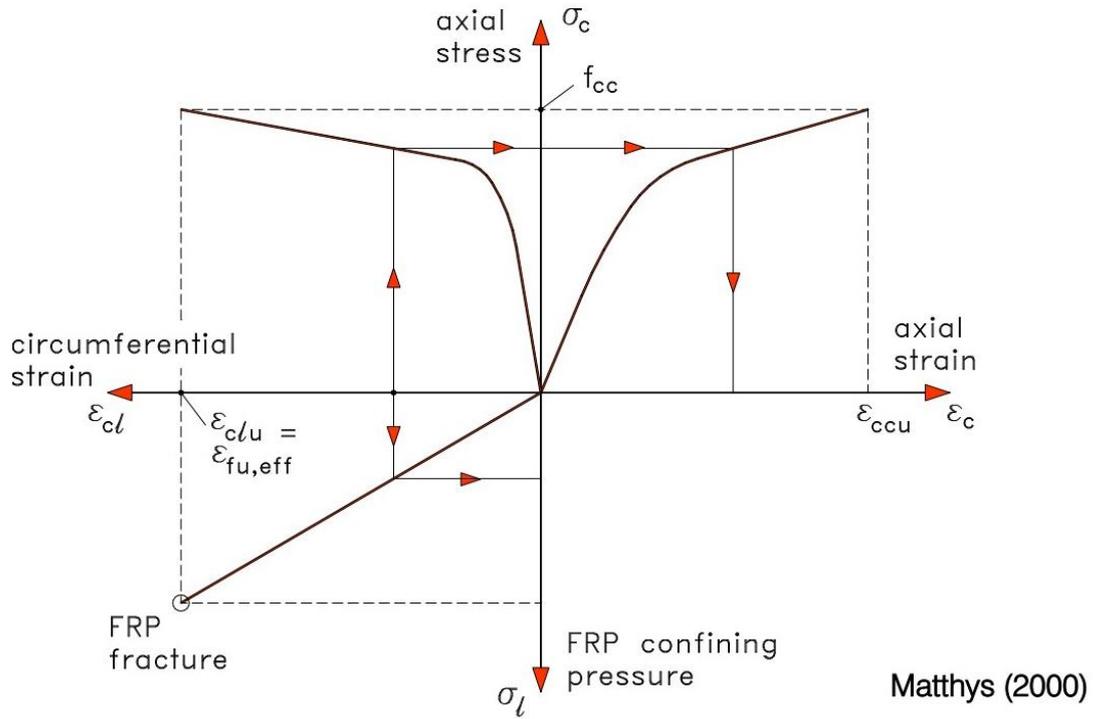
El confinamiento pasivo incrementa la resistencia y la deformación última del concreto.



**Ilustración 25 Confinamiento pasivo con FRP**

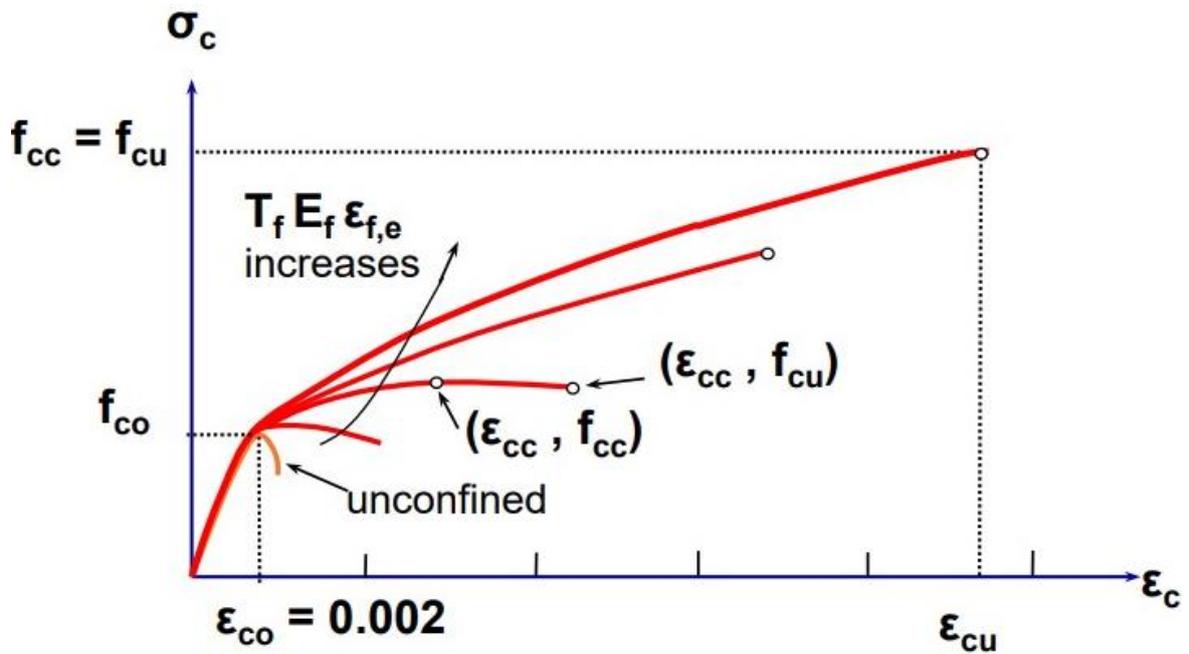
Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

Como se puede observar en las siguientes gráficas, un concreto confinado con fibra de carbono alcanza unos mayores resultados en las tensiones axiales.



Gráfica 9 Tensiones axiales

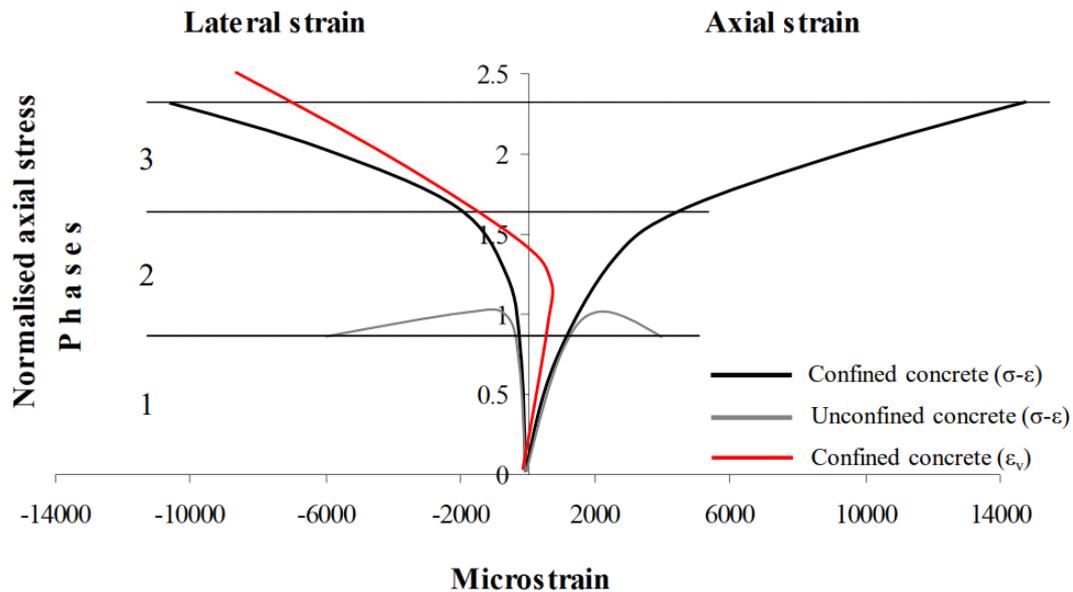
Fuente: (FIB Bulletin N° 90)



Gráfica 10 Deformación vs Fcc

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

Como se observa en la gráfica 10, el concreto no confinado alcanza una menor deformación inicial o deformación elástica.



**Gráfica 11 Carga axial normalizada**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

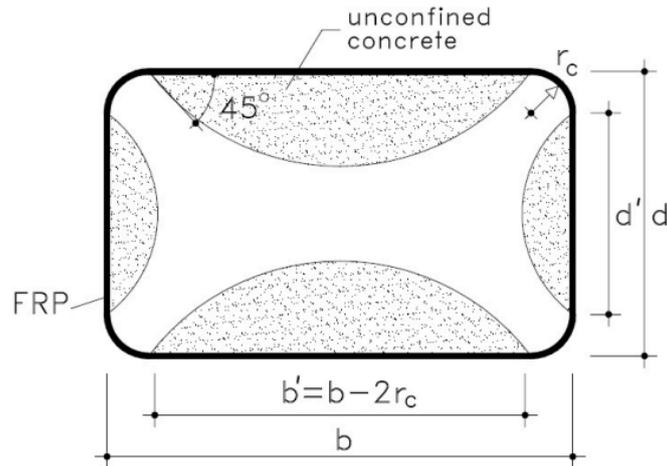
En la gráfica 11 se ilustra las tensiones laterales y tensiones axiales en el contexto de refuerzo con fibras de carbono en el concreto, en las diferentes fases generalmente se hace referencia al confinamiento del concreto. El confinamiento es importante porque mejora la capacidad del concreto para resistir las tensiones laterales, como las que se experimentan en elementos estructurales sometidos a flexión o compresión (FIB Bulletin N° 90).

(FIB Bulletin N° 90) menciona que el concreto sin confinar carece de refuerzo adicional alrededor de su sección transversal, siendo propenso a fisurarse y fallar fácilmente bajo cargas laterales. En cambio, el concreto confinado involucra el refuerzo de elementos estructurales mediante materiales compuestos de polímero reforzado con fibras (FRP), mejorando su capacidad para resistir tensiones laterales. La adición de FRP incrementa la resistencia a la compresión y la capacidad de carga en flexión, siendo especialmente útil en la rehabilitación

de estructuras existentes y en la mejora de la resistencia sísmica, destacando la importancia del confinamiento para fortalecer y aumentar la durabilidad del concreto.

### 3.7.2.3 Confinamiento pasivo con FRP para secciones rectangulares

En el caso de secciones rectangulares gran parte del área de la sección quedaría sin confinar como se muestra en la Ilustración 26.



**Ilustración 26 Confinamiento en secciones rectangulares**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

En el caso de secciones donde  $b/d > 2$  el efecto de confinamiento es despreciable. La deformación efectiva del FRP es menor que la deformación última a tracción debido a factores como: estado multi tensional, concentración de tensiones, resistencia reducida en esquinas y efecto de múltiples capas (FIB Bulletin N° 90).



**Ilustración 27 Refuerzo a confinamiento con fibra de carbono**

Fuente: (Sika, 2018)

Institut D'estudits estructurals (2021) afirma que la fibra de carbono es un elemento que puede aportar con el refuerzo a tensión, es de alta resistencia, de fácil colocación y además con una capacidad mayor inclusive que el mismo acero para resistir esfuerzos de tensión. También la fibra de carbono puede aportar confinamiento al material.

Como se mencionó anteriormente, la fibra de carbono mejora la resistencia a los impactos, la resistencia al fuego y el aislamiento térmico. La mayor resistencia aumenta la capacidad de los elementos compuestos para soportar esfuerzos de tensión y confinamiento (Institut D'estudits estructurals, 2021).

Institut D'estudits estructurals (2021) menciona fibra de carbono puede ser utilizada para reforzar vigas y restaurar su capacidad a la tensión, así como aumentar o reconstruir el confinamiento. En el caso de las vigas se puede utilizar en tiras para ayudar a la captación de los esfuerzos de tensión en el caso de que las varillas de acero estén muy deterioradas.

En las columnas, se considera una mejor disposición la colocación de un encamisado con fibra de carbono para restaurar su capacidad de resistir esfuerzos de tensión cuando el acero ha dejado de ejercer su función y aumenta el confinamiento (Theurer, 2016).

Institut D'estudits estructurals (2021) describe que, debido a su extrema esbeltez, la fibra de carbono tiene una alta resistencia a tracción, pero poca capacidad para absorber compresiones. Por esta razón, no se emplean fibras colocadas en la misma dirección de las compresiones, ni en las caras comprimidas de vigas a flexión ni en pilares. Sin embargo, mediante el uso de tejido de fibra de carbono en dirección perpendicular al esfuerzo de compresión, es posible realizar un zunchado transversal del elemento.



**Ilustración 28 Refuerzo por confinamiento**

Fuente: (Institut D'estudits estructurals, 2021)

Institut D'estudits estructurals (2021) menciona que la deformación del concreto en el plano perpendicular a la carga es impedida por el confinamiento de elementos comprimidos, lo que aumenta la resistencia a la compresión y la deformación de rotura del concreto confinado. Como resultado, el concreto confinado se encuentra en un estado tensional multiaxial de compresión.

La baja ductilidad de los elementos de confinamiento es necesaria porque el aumento de esta capacidad de carga es proporcional al aumento de la compresión transversal (Institut D'estudits estructurals, 2021).

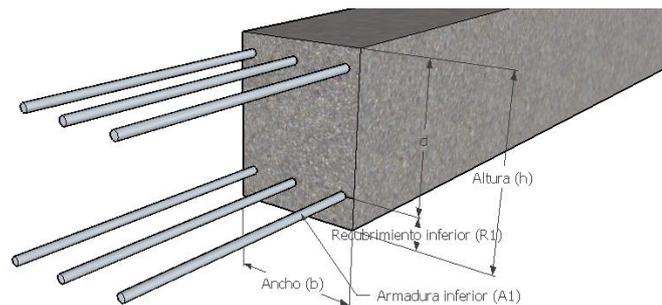
### **3.8 REFUERZO POR CORTANTE DE FIBRA DE CARBONO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

El refuerzo por cortante de la fibra de carbono en elementos estructurales de concreto armado es una técnica especializada que se utiliza para mejorar la capacidad de los elementos de concreto para resistir fuerzas cortantes. La técnica implica el uso de láminas o telas de fibra de carbono en áreas críticas de las estructuras de concreto para aumentar su capacidad de

resistencia a las fuerzas cortantes, como las que se producen en vigas, losas, columnas y otros elementos de concreto (Institut D'estudits estructurals, 2021).

### 3.8.1 RESISTENCIA AL CORTANTE

Meierhofer (2020) menciona que en la edición anterior de la norma ACI 318-14, se detallan ocho fórmulas para determinar la resistencia a cortante,  $V_c$ , sin tener en cuenta restricciones de aplicabilidad. Los usuarios podían optar por utilizar un enfoque de cálculo simplificado o uno más preciso. Uno de los objetivos del nuevo enfoque introducido en ACI 318-19 era simplificar las fórmulas de diseño para  $V_c$ , al mismo tiempo que consideraba factores como la altura del componente, la cantidad de refuerzo longitudinal y la tensión normal en el cálculo.



**Ilustración 29 Refuerzo a cortante**

Fuente: (Sika, 2018)

La resistencia al cortante  $V_c$ , de acuerdo con la norma ACI 318-19, se calcula para vigas de concreto reforzado no pretensado. Con las nuevas ecuaciones, ahora la altura de la barra, la cantidad de armadura longitudinal y la tensión normal se toman en consideración al calcular la resistencia a cortante,  $V_c$  (Meierhofer, 2020).

La determinación de la resistencia a cortante  $V_c$  depende de la presencia de la armadura de cortante insertada  $A_v$ . si la cantidad mínima de armadura de cortante  $A_{v, \min}$ , según las

especificaciones, se encuentra disponible o se supera, el cálculo de  $V_c$  se puede llevar a cabo mediante la Ecuación 1 (Meierhofer, 2020).

$$V_c = \left( 2 * \lambda * \sqrt{F'_c} + \frac{N_u}{6 * A_g} \right) * b_w * d$$

**Ecuación 1 Resistencia a cortante  $V_c$  según ACI 318-19**

Donde:

$V_c$  = Resistencia a cortante del concreto

$\lambda$  = Factor para concreto estándar o ligero

$f'_c$  = Resistencia a compresión del concreto

$N_u$  = Esfuerzo axial factorizado

$A_g$  = Área de la sección

$b_w$  = Anchura de la sección

$d$  = Profundidad estática eficaz

$$V_{c,b} = \left( 8 * \lambda * (\rho_w)^{\frac{1}{3}} * \sqrt{F'_c} + \frac{N_u}{6 * A_g} \right) * b_w * d$$

**Ecuación 2 Resistencia a cortante  $V_{c,b}$  según ACI 318-19**

Donde:

$V_{c,b}$  = Resistencia a cortante del concreto según la ecuación b)

$\Lambda$  = Factor para concreto estándar o ligero

$\rho_w$  = Relación de armadura longitudinal de la armadura de tracción

$f'_c$  = Resistencia a compresión del concreto

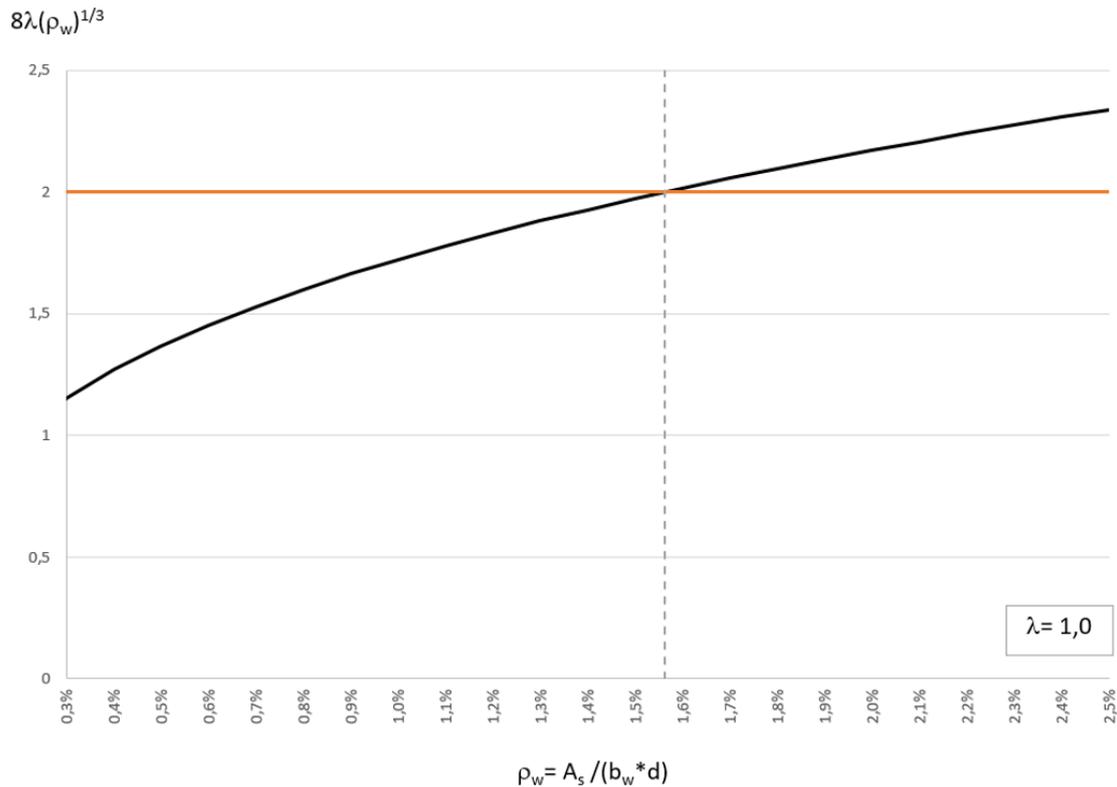
$N_u$  = Esfuerzo axial factorizado

$A_g$  = Área de la sección

$b_w$  = Anchura de la sección

$d$  = Profundidad estática eficaz

Si se comparan las ecuaciones Ecuación 1 y Ecuación 2 que se muestran arriba, se puede observar que en la Ecuación b), el factor  $2 \lambda$  ha sido reemplazado por el término  $8 \lambda (\rho_w)^{1/3}$ . La cuantía de armadura longitudinal  $\rho_w$  influye en el cálculo de la resistencia a cortante  $V_c$ . La siguiente gráfica muestra la distribución de  $8 \lambda (\rho_w)^{1/3}$  en función de  $\rho_w$  (con  $\lambda = 1$ ) (Meierhofer, 2020).



**Gráfica 12  $\rho_w$  Efecto en la ecuación b), tabla 22.5.5.1, ACI 318-19**

Fuente: (Meierhofer, 2020)

Anexo 1 Tabla 22.5.5.1 del ACI 318-19

$$V_{c,c} = \left( 8 * \lambda_s * \lambda * (\rho_w)^{1/3} * \sqrt{F_c'} + \frac{N_u}{6 * A_g} \right) * b_w * d$$

**Ecuación 3 Resistencia a cortante  $V_c$  Según ACI 318-19, Tabla 22.5.5.1, Ecuación c)**

Donde:

$V_c, C$  = Resistencia a cortante del concreto según la ecuación c) de la tabla 22.5.5.1

$\lambda_s$  = Factor para considerar la altura del componente

$\lambda$  = Factor para concreto estándar o ligero

$\rho_w$  = Relación de armadura longitudinal de la armadura de tracción

$f'_c$  = Resistencia a compresión del concreto

$N_u$  = Esfuerzo axial factorizado

$A_g$  = Área de la sección

$b_w$  = Anchura de la sección

Excepto por la variable  $\lambda_s$ , la Ecuación 3 es similar a la Ecuación 2 analizada anteriormente.

Para componentes estructurales con poco o ningún refuerzo de cortante, la resistencia al cortante del concreto  $V_c$  disminuye al aumentar la altura del componente estructural.

Al introducir el factor  $\lambda_s$ , se tiene en cuenta el "Efecto del tamaño". El factor  $\lambda_s$  se determina según la ecuación 22.5.5.1.3 del ACI que es la siguiente: (Meierhofer, 2020).

$$\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + \frac{d}{10}}} \leq 1$$

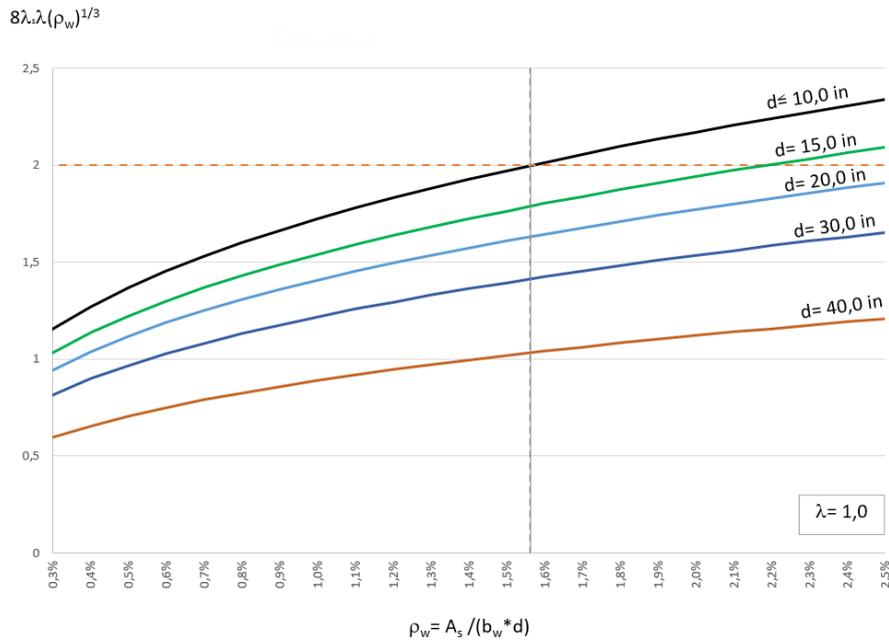
#### **Ecuación 4 Factorización $\lambda_s$ para considerar la altura del componente según ACI 318-19**

Donde:

$\lambda_s$  = Factor para considerar la altura del componente

$d$  = Profundidad estática eficaz

La reducción de la resistencia al cortante  $V_c$  por el factor  $\lambda_s$  sólo es eficaz para alturas estructurales  $d > 10$ in. La ilustración siguiente muestra la distribución del término  $8\lambda_s\lambda(\rho_w)^{1/3}$  para los diferentes cantos útiles  $d$  (Meierhofer, 2020).



**Gráfica 13 Profundidad eficaz d Influencia en  $V_c$  ecuación c), tabla 22.5.5.1 ACI 318-19**

Fuente: (Meierhofer, 2020)

La determinación de la resistencia a cortante  $V_c$  según la tabla 22.5.5.1 del ACI 318-19 (Anexo 1) depende de la altura de la armadura de cortante insertada  $A_v$ . El requisito previo para usar la Ecuación 1 y Ecuación 2 es que se aplique la armadura de cortante mínima según 9.6.3.4. Por esta razón, en el primer paso se comprueba si se debe considerar una armadura mínima (Meierhofer, 2020).

$$V_u > \lambda * \sqrt{f'_c} * b_w * d$$

**Ecuación 5 Requisitos de la armadura mínima de cortante según ACI 318-19, 9.6.3.1**

Donde:

$V_u$  = Carga de cálculo de la fuerza cortante

$\lambda$  = Factor para concreto estándar o ligero

$f'_c$  = Resistencia a compresión del concreto

$b_w$  = Anchura de la sección

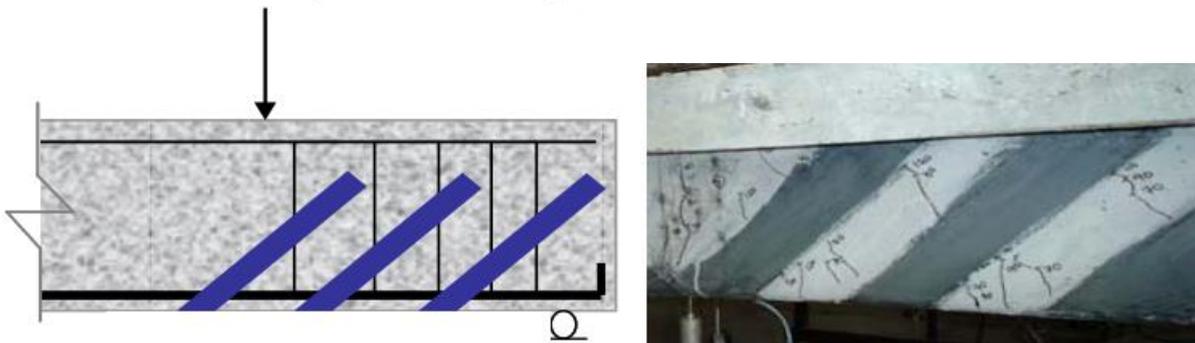
$d$  = Profundidad estática eficaz

### 3.8.2 RESISTENCIA AL CORTANTE DE LA FIBRA DE CARBONO

Se incrementa la capacidad a cortante usando FRP con las fibras ortogonales al eje axial del elemento a rehabilitar (FIB Bulletin N° 90).

Al igual que la resistencia por flexión, existen distintas técnicas de rehabilitación mediante la resistencia a la flexión de la fibra de carbono las cuales son:

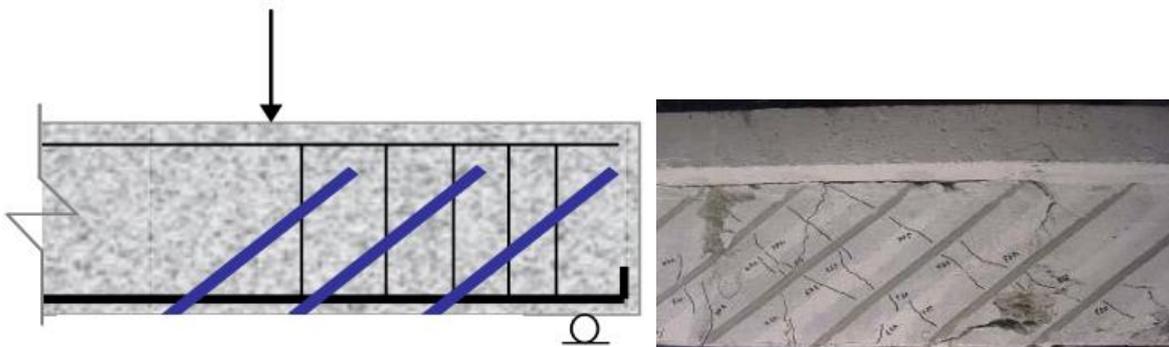
- FRP - EBR (Externally Bonded Reinforcement or Plate Bonding por sus siglas en ingles)



**Ilustración 30 FRP - EBR por cortante**

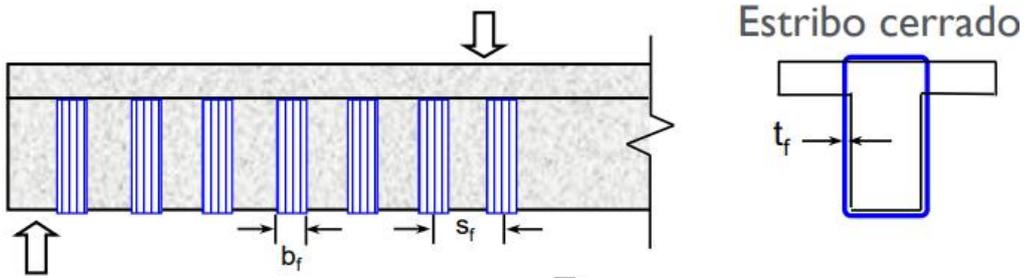
Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

- FRP - NSMR (Near Surface Mounted Reinforcement por sus siglas en inglés)



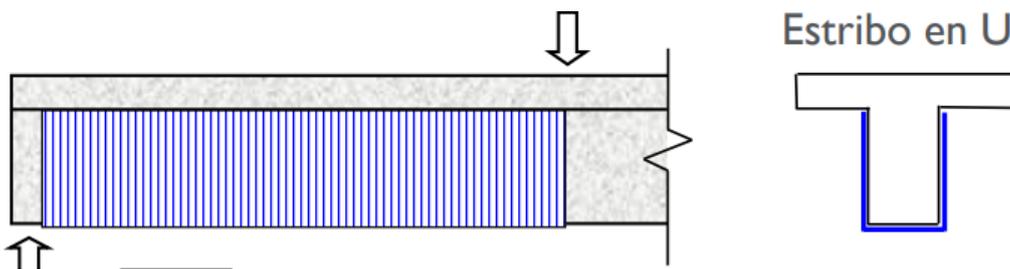
**Ilustración 31 FRP- NSMR por cortante**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)



**Ilustración 32 Estribos discontinuos para refuerzo por cortante**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)



**Ilustración 33 Chaqueta continua para refuerzo por cortante**

Fuente: (FIB Bulletin N° 90)

La viabilidad de usar envolturas U externas ha garantizado su incremento en la capacidad de carga en vigas de concreto reforzado.

En particular las siguientes conclusiones pueden obtenerse basándose en el comportamiento observado:

- Reforzar la viga mediante envolturas U de láminas de FRP incrementa la resistencia a cortante.
- Los elementos reforzados exhiben un incremento en la capacidad de cortante sobre los elementos que no están reforzados en un rango del 11% al 34% esto depende de la técnica del sistema de refuerzo que fuera usado para reforzar.
- El incremento en el número de capas no resulta en un incremento dramático en la capacidad a cortante para vigas con o sin anclaje en sus extremos.
- Las vigas reforzadas con láminas ancladas con envoltura U simple tienen un mejor funcionamiento que las vigas sin anclar con doble envoltura U en un 17%.

- Las vigas reforzadas con láminas ancladas con envoltura U simple tienen un mejor comportamiento que las vigas reforzadas con láminas ancladas con envoltura U (C. Escrig Pérez, 2016).



**Ilustración 34 Refuerzo a cortante**

Fuente: (Institut D'estudits estructurals, 2021)

Institut D'estudits estructurals (2021) menciona que cuando existe refuerzo con fibras, el esfuerzo cortante se distribuye proporcionalmente entre los cercos de armadura transversal y los tejidos de fibra de carbono. El cosido transversal es la base del refuerzo. La mayoría de los modelos de diseño de cortante se basan en el estribo de acero, al utilizar una analogía de cosido de tirantes traccionados en el alma de la viga.

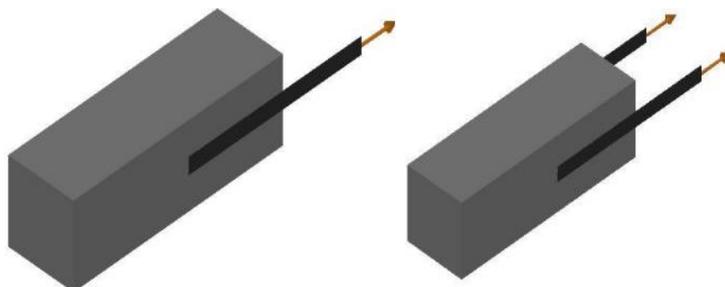
A diferencia del estribo interno, la carga que puede soportar la fibra depende de su capacidad para soportar carga por adhesión externa. De esta manera, la eficiencia del refuerzo dependerá principalmente de la longitud de anclaje disponible (Institut D'estudits estructurals, 2021).



**Ilustración 35 Reforzamiento por cortante con CFRP**

Fuente: (UPN, 2021)

Los trabajos siguientes Khalifa & Nanni (1999) se enfocaron en estudiar el comportamiento a cortante de vigas de sección T de concreto reforzado al ser reforzadas con láminas de CFRP. con distintas configuraciones, ya sean mediante la aplicación de capas a  $90^\circ$ ,  $0^\circ$ , la combinación de ambos y el anclaje en los extremos de las láminas de CFRP. Los resultados experimentales mostraron que la adherencia externa de láminas de CFRP puede incrementar la capacidad a cortante de las vigas en una forma significativa (C. Escrig Pérez, 2016).



**Ilustración 36 Esquema de especímenes para ensayos a cortante simple y doble**

Fuente: (Solis, 2015)

### **3.9 MECÁNICA DE ADHERENCIA DE LA FIBRA DE CARBONO AL CONCRETO**

Una buena adherencia en la zona de interfase fibra – matriz se obtiene a través de una buena transmisión de esfuerzos del concreto a la fibra (Institut D'estudits estructurals, 2021).

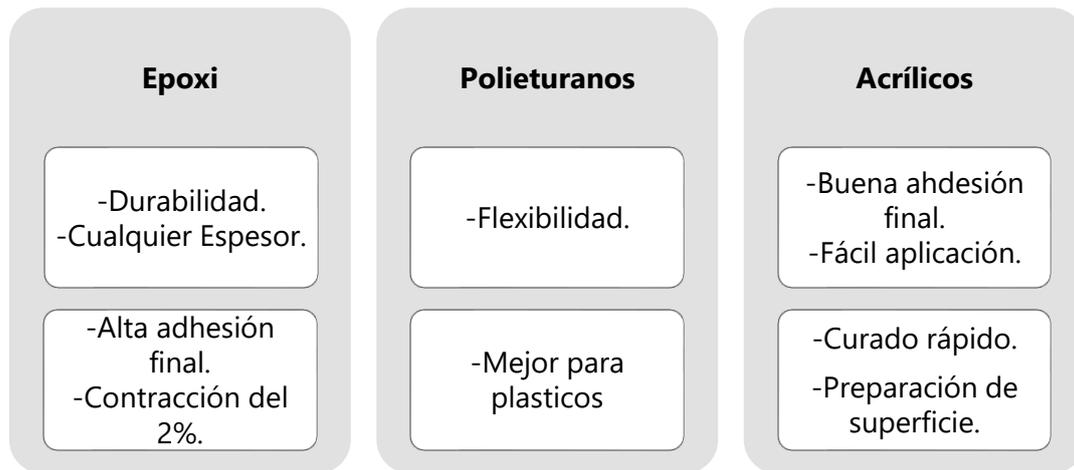


**Ilustración 37 Preparación del soporte para una buena adherencia**

Fuente: (Institut D'estudits estructurals, 2021)

(Alfons o Recuero, 1997) afirman que la conexión del refuerzo de FRP a la estructura, como con otros tipos de refuerzo, puede lograrse mediante dos métodos principales: la adherencia mediante adhesivos, que es el enfoque más común, o a través de conexiones mecánicas. En el caso de las conexiones mecánicas, estas se llevan a cabo en elementos específicos de la estructura donde se han fortalecido adecuadamente las áreas destinadas a la unión mecánica (mediante tornillos, pasadores, anclajes, entre otros) con el fin de que puedan soportar las tensiones generadas por el refuerzo.

Según el modelo FIB Bulletin 14 (2) (2001) dice que La segunda técnica permite calcular el aumento máximo de la tensión de tracción dentro del FRP, que puede transferirse mediante tensiones de adherencia entre dos fisuras de flexión subsecuentes.



**Gráfica 14 Ventajas de los sistemas de adherencia**

Elaboración propia. Fuente (PITRA, 2010)

En el contexto de fibras o telas preimpregnadas, el monómero de impregnación cumple la función de agente adhesivo, mientras que, en el caso de láminas prefabricadas, la forma común de unirlos a las estructuras existentes es mediante la aplicación de adhesivos. Por lo tanto, la elección de un adhesivo apropiado se vuelve un aspecto crucial en la utilización de estos materiales compuestos (Alfons o Recuero, 1997).

Dado que los materiales utilizados en la construcción son extremadamente diversos, como concreto, piedra, metales, madera, plásticos, vidrio, entre otros, existe una amplia gama de adhesivos diseñados para unirlos de manera efectiva y económicamente eficiente desde un punto de vista técnico (Alfons o Recuero, 1997).

El sistema completo de refuerzo de estructuras con laminados está formado por:

- Primer, para garantizar la adherencia y anclaje del refuerzo con el soporte del elemento a reparar.
- Adhesivo, para regularizar el soporte, adherir y transferir esfuerzos entre el soporte y el compuesto resistente.

- Laminado, compuesto preformado de fibras de carbono conformadas dentro del polímero (Solis, 2015).

Solis (2015) afirma que: El desplazamiento de la zona de pegado activa significa que solo una parte del pegado es efectiva en cualquier momento. Esto significa que a medida que las fisuras en el concreto se expanden, la resistencia de adherencia disminuye lentamente en la región cercana a la carga mientras que se activa en la región más allá de la carga. Por lo tanto, la fuerza de anclaje no siempre puede aumentar con el aumento de la longitud de pegado y la resistencia a la rotura del laminado nunca puede alcanzarse, aunque la longitud de pegado sea muy grande (págs. 19-20).



**Ilustración 38 Proceso de preparación de los ensayos de adherencia**

Fuente: (Solis, 2015)



**Ilustración 39 Preparación correcta de la superficie**

Fuente: (Solis, 2015)



**Ilustración 40 Aplicación de la resina epoxi**

Fuente: (Solis, 2015)



**Ilustración 41 Colocación laminados CFRP**

Fuente: (Solis, 2015)

La secuencia de colocación de los laminados se muestra en las imágenes de la Ilustración 39, Ilustración 40 e Ilustración 41. Primero, se limpia completamente la superficie previamente preparada y luego se aplica la impregnación. Después de una hora y antes de 24 horas, se debe aplicar uniformemente el adhesivo epoxi sobre la superficie impregnada, con un espesor de 1.5 mm, para garantizar un pegado adecuado. Después de eso, se colocan los laminados, asegurándose de que no quede aire atrapado en la interfaz epoxi-laminado. Los laminados deben presionar cuidadosamente mientras se colocan (Solis, 2015).

### 3.9.1 NORMATIVAS Y CÓDIGOS

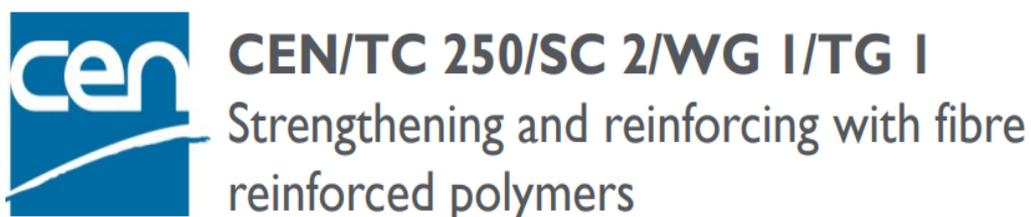
Europa, Japón, Canadá y los Estados Unidos de América crean y analizan códigos y normas para sistemas de FRP adheridos externamente. La Asociación Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE), el Instituto Japonés del Concreto (JCI) y el Instituto técnico de investigación de ferrocarriles (RTRI) han publicado varios artículos en los últimos 25 años sobre el uso de sistemas de FRP para reforzar estructuras hechas de concreto reforzado (Solis, 2015, pág. 10).

El Grupo de tarea 9.3 de la Federación Internacional para el concreto reforzado (FIB) ha publicado un boletín en Europa sobre guías de diseño de sistemas de concreto reforzado adheridos externamente para el refuerzo de estructuras de concreto reforzado (Solis, 2015, pág. 10).



**Ilustración 42 FIB 2007**

Fuente: (FIB Bulletin No. 40, 2007)

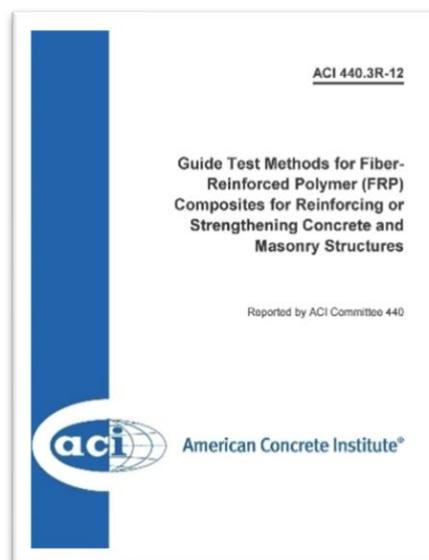


**Ilustración 43 Eurocódigos**

Fuente: (CEN, 2022)

En América del Norte, en Canadá, la Asociación Canadiense de Normas ha aprobado el código "Design and construction of building components with fiber reinforced polymers" (CSA S806-02). En los Estados Unidos de Norteamérica el Instituto Americano del Concreto es el encargado de publicar las guías y códigos para el diseño y construcción de los sistemas FRP adheridos externamente, actualmente han publicado las siguientes normativas y códigos:

- ACI 440.3R-04 "Guide Test Methods for Fiber- Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing Strengthening Concrete Structures".
- ACI 440.4R-04 "Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons";
- ACI 440.2R-08 "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures" (Solis, 2015, pág. 10).



**Ilustración 44 ACI 440.3R-04**

Fuente: (American Concrete Institute, 2021)

### **3.10 USOS DE REFUERZO CON FIBRA DE CARBONO A NIVEL MUNDIAL**

A continuación, se describen algunos ejemplos donde la fibra de carbono ha resultado exitoso como método de rehabilitación para las estructuras.

### 3.10.1 TORRE CHOCAVENTO EN PERÚ

La Torre Chocavento (Edificio Chocavento) es un edificio de oficinas de gran altura ubicado en el distrito de San Isidro de Lima, Perú (Baca, 2010).

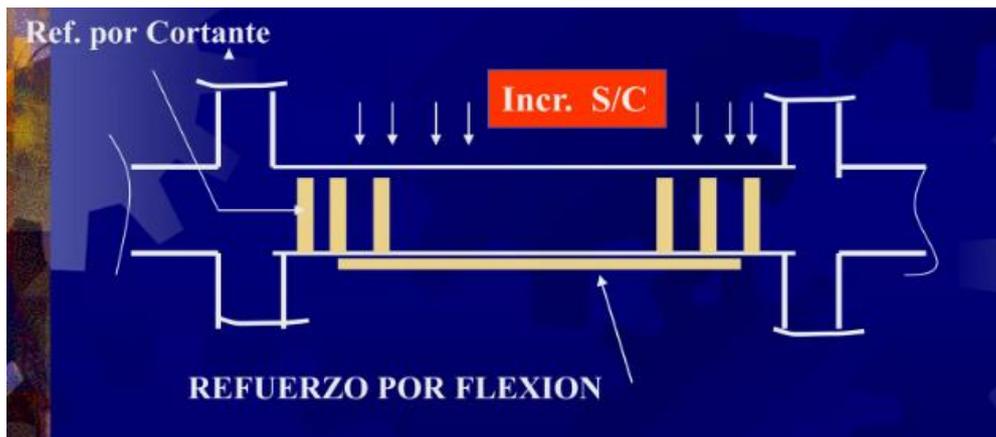
La Torre Chocavento, completada en 2001, se erige con una altura de 107 metros, consolidándose como el tercer edificio más alto de Perú, superado únicamente por el "Centro Cívico de Lima" (Civic Center of Lima) y el "Westin Libertador Hotel". Conformada por 25 pisos sobre el suelo y cinco subsuelos, la torre destaca no solo por su imponente presencia sino también por su impactante diseño y características arquitectónicas (Baca, 2010).

Baca (2010) describe que el costo total de la construcción ascendió a US\$15.3 millones, reflejando la inversión realizada en este proyecto emblemático. La materialización de la visión arquitectónica estuvo a cargo de Diego Sánchez Gálvez, quien desempeñó el papel crucial en el diseño del edificio. A nivel estructural, el ingeniero Hans Hollein contribuyó con su experiencia, asegurando la estabilidad y solidez de la estructura. La empresa Cosapi, como contratista principal, desempeñó un papel fundamental en llevar a cabo la visión arquitectónica y garantizar la calidad durante todas las fases de construcción.



**Ilustración 45 Torre Chocavento – Perú**

Fuente: (RAHI , 2022)



**Ilustración 46 Diseño del refuerzo por cortante y por flexión**

Fuente: (Baca, 2010)

Al aplicarse en vigas, el sistema FRP incrementa sensitivamente la capacidad de resistencia a la flexión y al corte en estos elementos. La resistencia adicional es tal, que una viga agrietada por las cargas a las que ha sido sometida, reforzada de extremo a extremo posteriormente con este sistema, puede llegar a superar su capacidad de carga adicional (Baca, 2010).



**Ilustración 47 Refuerzo a flexión de las columnas de la torre**

Fuente: (Baca, 2010)



**Ilustración 48 Refuerzo a Cortante de las columnas de la torre**

Fuente: (Baca, 2010)

Al aplicar este sistema en la cara del fondo de la viga a lo largo de su longitud, se incrementa su resistencia a la flexión y con esto se mejora el control de su deflexión. Mientras tanto, si se aplica en las caras laterales, incrementamos su resistencia al corte (Baca, 2010).

### 3.10.2 TREN ELÉCTRICO DE LIMA – PERÚ

El Tren Eléctrico de Lima, también conocido como Línea 1 del Metro de Lima y Callao, es el sistema de trenes elevado y subterráneo cuya red se extiende desde el sur hacia el noreste de la metrópoli y atraviesa un total de 26 estaciones a lo largo de 34,6 km de vía (Baca, 2010).

Fue inaugurado parcialmente el 29 de abril de 1990 y finalmente inaugurado en su totalidad el 11 de julio de 2011. El proyecto experimentó significativos retrasos en su construcción, lo que llevó a que su inauguración se demorara más de dos décadas (Baca, 2010).

A pesar de los desafíos en su construcción, el Metro de Lima tiene planes de expansión para unir más distritos de la ciudad (Baca, 2010).



**Ilustración 49 Tren eléctrico de Lima**

Fuente: (Baca, 2010)

Los pilares se diseñaron hace más de tres décadas y la experiencia de los sismos en México y Chile han modificado las exigencias de los códigos de diseño en la zona. En esta rehabilitación se requería dar mayor resistencia y ductilidad a las columnas circulares y monocolumnas (Baca, 2010).



**Ilustración 50 Preparación de la superficie**

Fuente: (Baca, 2010)



**Ilustración 51 Preimpregnación de las fibras**

Fuente: (Baca, 2010)



**Ilustración 52 Colocación de la fibra con la resina Epoxi**

Fuente: (Baca, 2010)



**Ilustración 53 Columna circular ya reforzada.**

Fuente: (Baca, 2010)

Se aplicaron 2 capas de Fibra de Fibra de carbono para confinar la sección, lo que le otorga mayor resistencia axial, mayor resistencia por cortante y por flexión a la columna (Baca, 2010).

### 3.10.3 CUBE – ALEMANIA

El primer edificio del mundo construido con concreto de fibra de carbono en lugar de acero como elemento de refuerzo ya es una realidad en Dresde. La construcción del edificio Cube es el resultado de diez años de investigación de la Technische Universität Dresden (TU Dresden), que ha sido posible gracias a la colaboración con el estudio de arquitectura HENN (CDT, 2023).

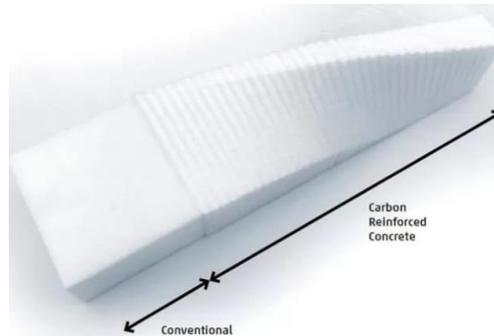


**Ilustración 54 Edificio Cube, Alemania**

Fuente: (CDT, 2023)

CDT (2023) menciona que como el refuerzo de fibra de carbono no es susceptible a la corrosión, requiere mucho menos cemento para el encapsulamiento habitualmente necesario para evitar infiltraciones. Esto hace que las superficies sean más delgadas y ligeras, pero con un mayor nivel de flexibilidad para el diseño de formas. Según los investigadores, el uso de cemento de fibra de carbono reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 50% en comparación con el concreto reforzado. Este porcentaje se alcanzó al tener en cuenta que la producción de fibra

de carbono tiene en sí misma una elevada huella de carbono (8 veces superior a la del acero por unidad de peso). Sin embargo, su resistencia permite reducir considerablemente el uso de material, con lo que se reducen las emisiones a lo largo del tiempo.



**Ilustración 55 Diseño del edificio Cube**

Fuente: (CDT, 2023)

#### 3.10.4 EDIFICIO LAUREANO COSTA RICA

El edificio Laureano Chandi fue construido en el año 1962 e inaugurado en el año 1966, mucho antes de promulgado el primer código sísmico de Costa Rica en el año 1974. Por lo tanto, el reforzamiento estructural de esta edificación de este edificio ayuda con que esta cumpla con los requerimientos del código sísmico vigente en el país Centroamericano, brindando un mayor nivel de seguridad a los usuarios y además prolongando la vida útil por muchos años más (Barboza Mejia, 2023).



**Ilustración 56 Edificio Laureano**

Fuente: (Barboza Mejia, 2023)

La rehabilitación del edificio Laureano fue llevada a cabo con varios métodos de reforzamiento estructural. Es por eso por lo que fue seleccionada la empresa Aplitec para llevar a cabo una obra tan importante. El reforzamiento estructural con materiales compuestos FRP del edificio Laureano Echandi de Caja costarricense del Seguro Social (Barboza Mejia, 2023).

Barboza Mejia (2023) menciona que su tarea era mejorar la resistencia y flexibilidad de las vigas incorporando fibra de carbono, mejorando así su resistencia a la flexión por corte y proporcionando un mayor confinamiento. Además, se nos asignó fortificar el muro oeste del edificio, mejorando la capacidad de confinamiento del concreto. Al integrar la tecnología en el proceso de construcción, pudimos agilizar el cronograma del proyecto. Este enfoque demostró ser altamente eficiente y mínimamente disruptivo, ya que la instalación de refuerzo de fibra de carbono nos permitió adaptarnos a la geometría única de cada elemento sin alterar sus dimensiones originales. En consecuencia, reforzamos con éxito múltiples componentes de la estructura preservando su forma original.



**Ilustración 57 Reforzamiento de las vigas del edificio**

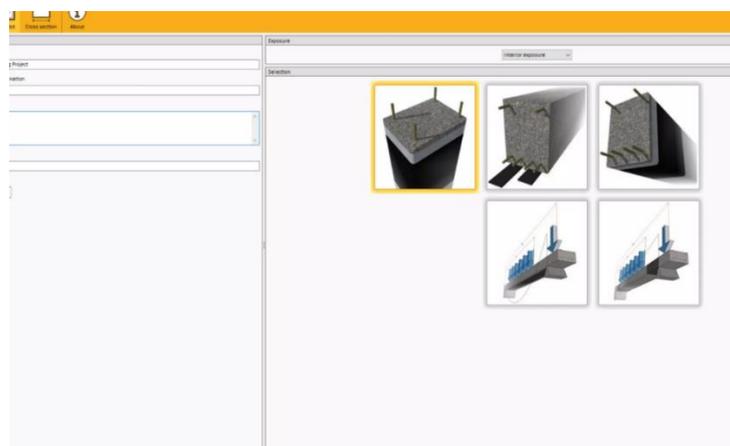
Fuente: (Barboza Mejia, 2023)

### 3.11 SOFTWARES PARA EL DISEÑO DE REFUERZOS CON LAMINADOS DE FIBRA DE CARBONO

En el panorama actual de la ingeniería, el uso de software especializado se ha vuelto fundamental para el diseño, análisis y optimización de estructuras. Estas herramientas permiten a los ingenieros modelar complejas interacciones estructurales, realizar análisis detallados y explorar una variedad de escenarios de carga. Además, los avances tecnológicos han permitido la incorporación de nuevas funcionalidades, como la simulación de materiales avanzados como la fibra de carbono, lo que facilita la exploración de soluciones innovadoras y eficientes para los desafíos de ingeniería modernos. Como ejemplo de Software para el diseño de refuerzos con laminados de fibra de carbono se puede mencionar:

#### 3.11.1 SIKA CARBODUR DESIGN SOFTWARE

SIKA Perú (2024) afirman que han colaborado a CYPE en el desarrollo de una herramienta informática llamada SIKA® CarboDur Design Software. Esta herramienta permite a los profesionales calcular de forma automática proyectos de refuerzo estructural utilizando las diversas soluciones de fibra de carbono ofrecidas por SIKA. Estas soluciones están diseñadas para cumplir con normativas internacionales específicas. David Vázquez Cacho, responsable Internacional de Sika para el soporte técnico de los sistemas de refuerzo de la compañía mediante composites, ha compartido información relevante sobre esta innovadora colaboración.

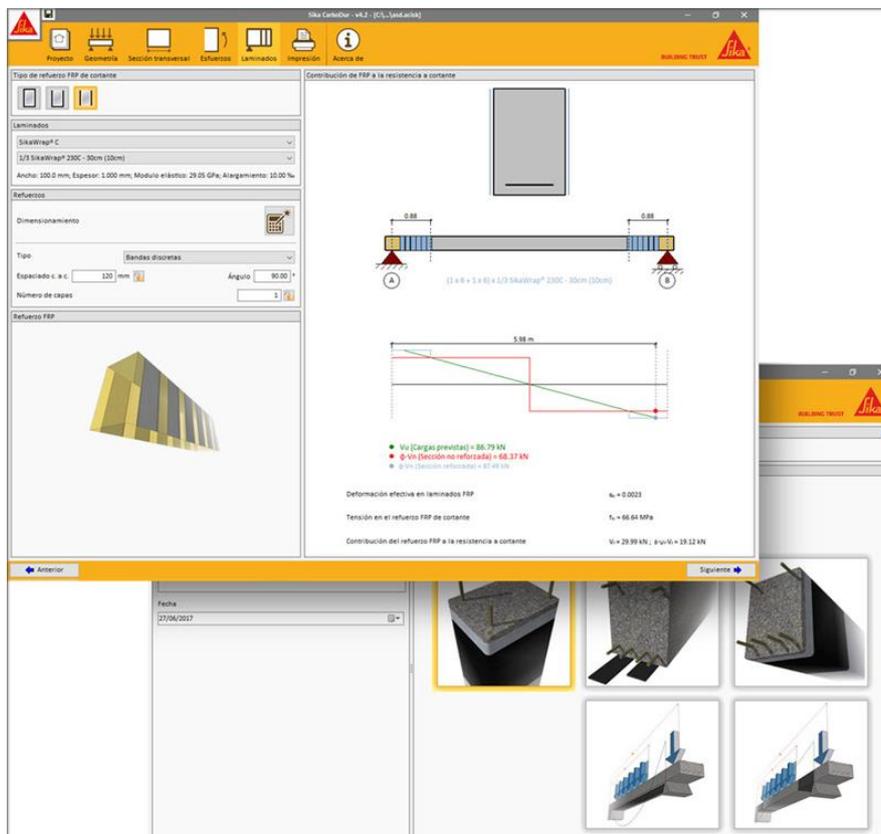


**Ilustración 58 3.11.1 SIKA CarboDur Design Software**

Fuente: (SIKA Perú, 2024)

Sika ha colaborado con CYPE en el desarrollo de un software llamado SIKA® CarboDur Design Software, que permite el cálculo de refuerzos de fibra de carbono en estructuras. Este software actualmente cumple con normativas internacionales específicas, como la normativa norteamericana ACI 440.R2-08, la norma Suiza SIA 166 y la británica TR-55 (SIKA Perú, 2024).

SIKA Perú (2024) mencionan que El nuevo software desarrollado por CYPE y SIKA está adaptado a normativas internacionales específicas. Cumple con la normativa American Concrete Institute (ACI440.2R-08) de América, utilizada también en países de Asia. Además, se ha adaptado a la normativa SIA 166 de Suiza y la TR-55 británica, basada en el Eurocódigo 2. Este software se irá ajustando a normativas específicas de soluciones constructivas, considerando que algunos países como España no disponen de ellas.



**Ilustración 59 Pruebas realizadas en el Software**

Fuente: (SIKA Perú, 2024)

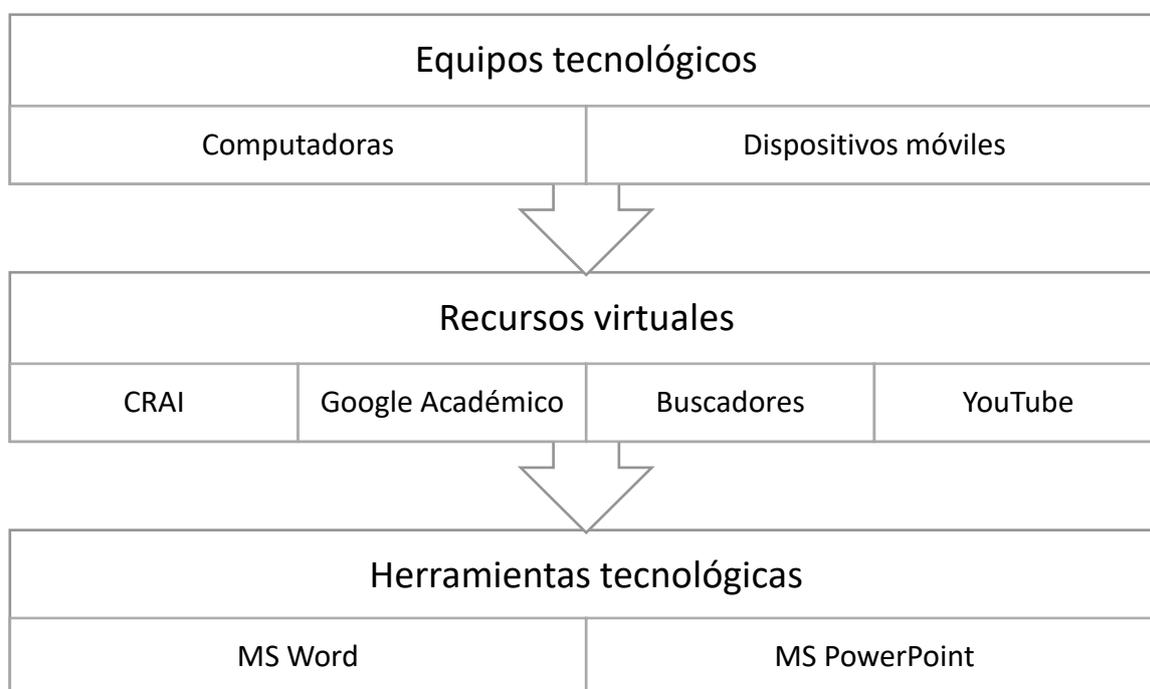
## IV METODOLOGÍA

La investigación actual explora el fascinante campo del reforzamiento de estructuras de concreto con fibras de carbono. Se ha utilizado un enfoque cualitativo para abordar este complejo y crucial tema. En este apartado se combina la revisión detallada de fuentes secundarias, el uso de buscadores en línea, la consulta de libros electrónicos especializados y la revisión completa de tesis de graduación previas.

### 4.1 ENFOQUE

Para la construcción de este proyecto de investigación se utilizó una metodología cualitativa, para abordar el problema de investigación, al tomar en consideración herramientas como entrevistas a expertos y apreciaciones in situ de parte de los investigadores.

El enfoque cualitativo se centra en obtener un entendimiento detallado de los fenómenos complejos relacionados con el refuerzo de estructuras de concreto con refuerzo de fibras de carbono, en estructuras localizadas en el Distrito Central, por medio de entrevistas a expertos conocedores de los desafíos, ventajas y desventajas al utilizar la fibra de carbono como reforzamiento de estructuras existentes.

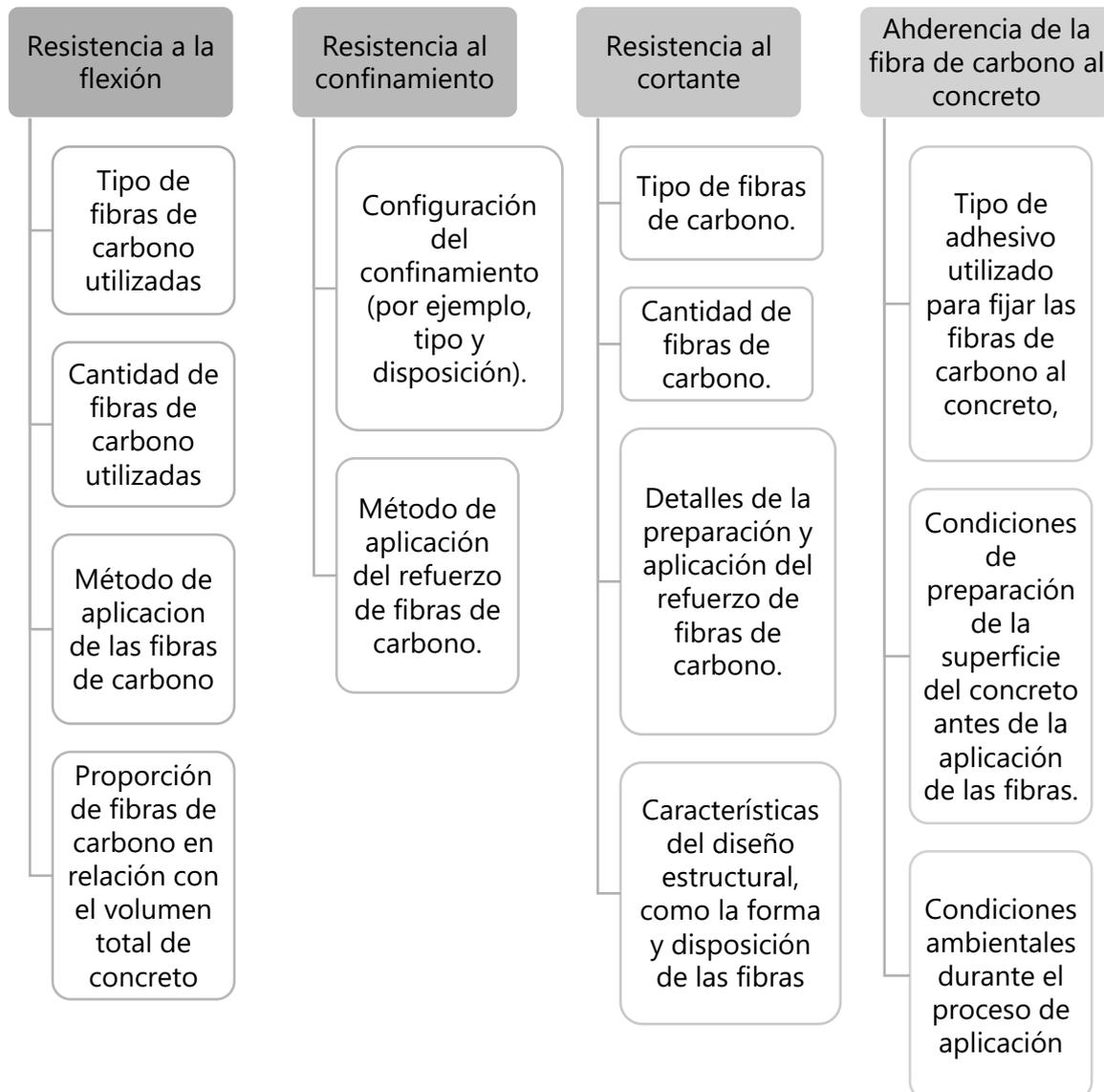


**Gráfica 15 Herramientas del enfoque**

Elaboración Propia.

## 4.2 VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

Se refiere al elemento que experimenta alteraciones o influencias debido a una variable independiente. Puede tratarse de atributos, cualidades, eventos, entre otros. En todos los contextos, se trata de una variable no constante, y es aquella que el investigador busca evaluar. (Tesis y Másters, 2022).



**Gráfica 16 Variables de la investigación**

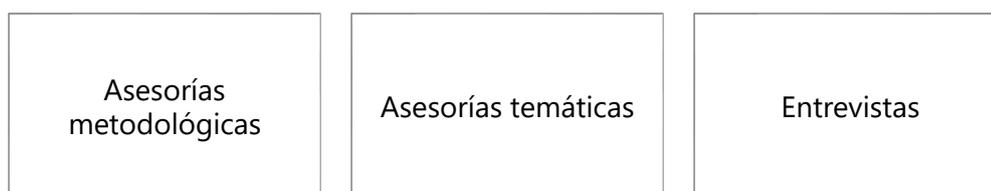
Elaboración Propia. Fuente: (Solis, 2015)

### 4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Useche, Artigas, Queipo, & Perozo (2019) afirman que el proceso de medición de una variable requiere la utilización de técnicas tales como: la entrevista, observación, revisión documental, encuesta, sociometría y sesión en profundidad; así como de instrumentos como el cuestionario, test, prueba de conocimiento, guía de entrevista, guía de observación, test sociométrico, entre otros, que permitan al investigador acceder a los datos necesarios para la investigación (pág. 30).

#### 4.3.1 FUENTES PRIMARIAS

Una fuente "de primera mano", también conocida como fuente primaria, es una fuente que proporciona testimonios o pruebas directas sobre el tema de la investigación y está escrita por la persona directamente involucrada en el proceso de investigación. Son esos registros o datos originales que proporcionan información directa y no interpretada sobre el tema a tratar. Estas fuentes son creadas en el momento del evento o período estudiado y no son mediadas por intermediarios (GOMEZ, 2012).



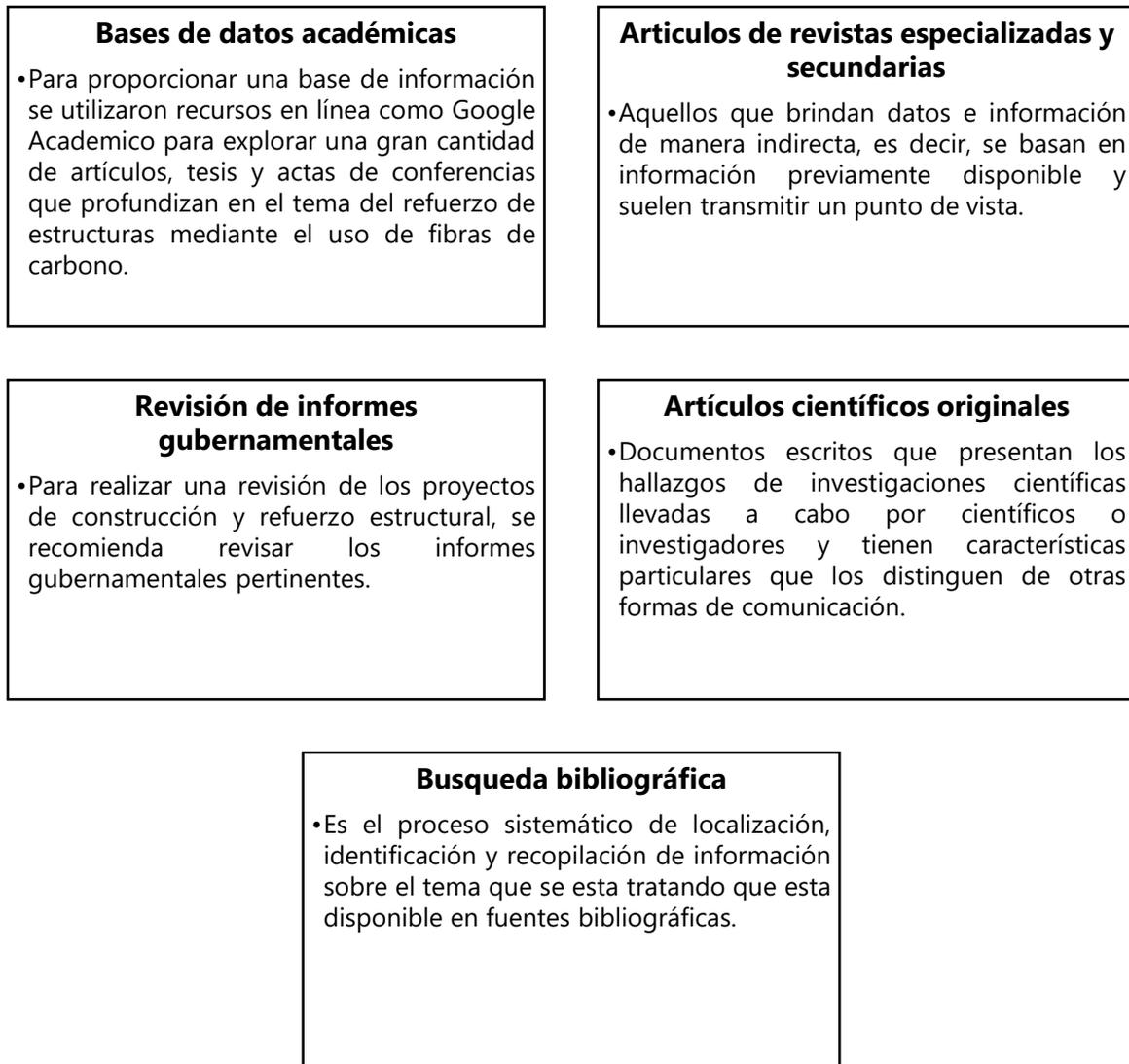
**Gráfica 17 Fuentes primarias utilizadas**

Elaboración Propia.

#### 4.3.2 INVESTIGACIÓN DE FUENTES SECUNDARIAS

Para enriquecer la investigación y obtener una visión más completa sobre un tema en particular, se recurre a diversas fuentes secundarias, como bases de datos académicas, la

revisión de revistas especializadas, la revisión de informes gubernamentales, asesorías temáticas y metodológicas (Useche, Artigas, Queipo, & Perozo, 2019, pág. 30).



**Gráfica 18 Técnicas y herramientas aplicados**

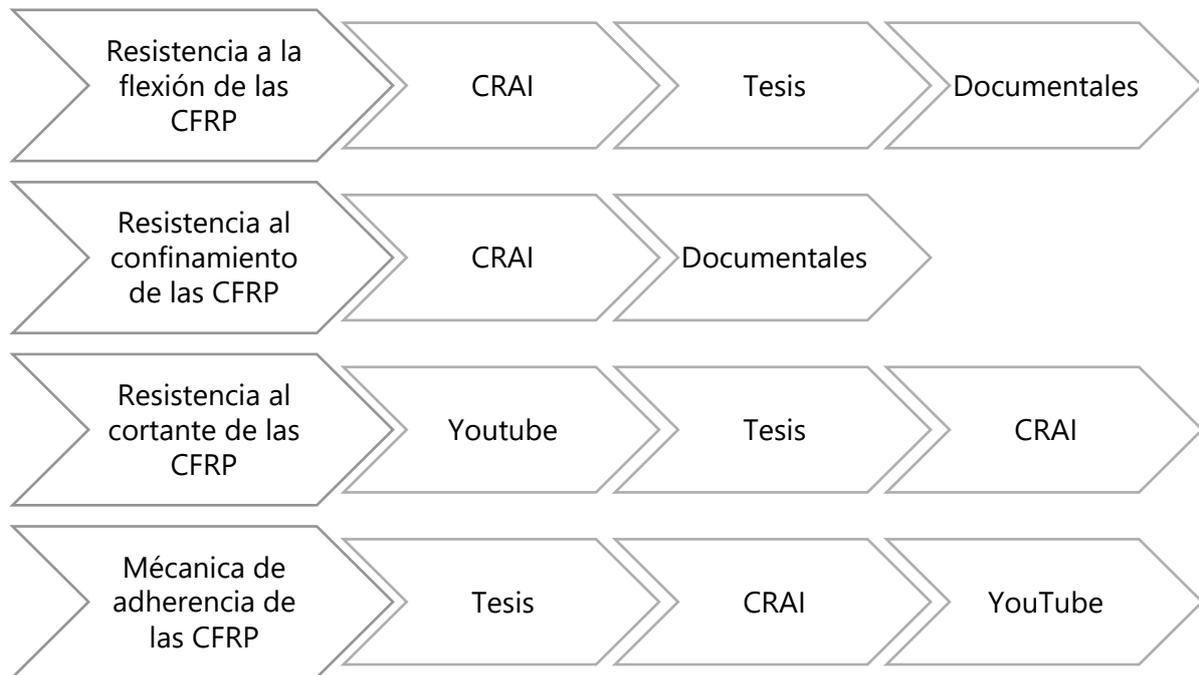
Elaboración Propia. Fuente: (Tesis y Másters, 2022)

En cuanto a las asesorías temáticas han sido brindadas por el Ingeniero Víctor Alonzo Martínez Reyes.

#### **4.4 METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

En este apartado se gráfica como se ha obtenido la información y los datos resaltados en esta investigación.

El esquema SmartArt detalla cada uno de los temas importantes del marco teórico y sus fuentes principales.



**Grafica 19 Herramientas y sitios utilizados**



Ingeniero Roberto Lagos encargado de ventas de Lazarus & Lazarus en sucursal de Suyapa, Tegucigalpa



MSc. Ing. Luz Marina Funes, docente de la materia Vías de Comunicación II



Ingeniero Luis Francisco Perna, encargado de ventas y especializo de polímeros de Lazarus & Lazarus en sucursal de Suyapa, Tegucigalpa

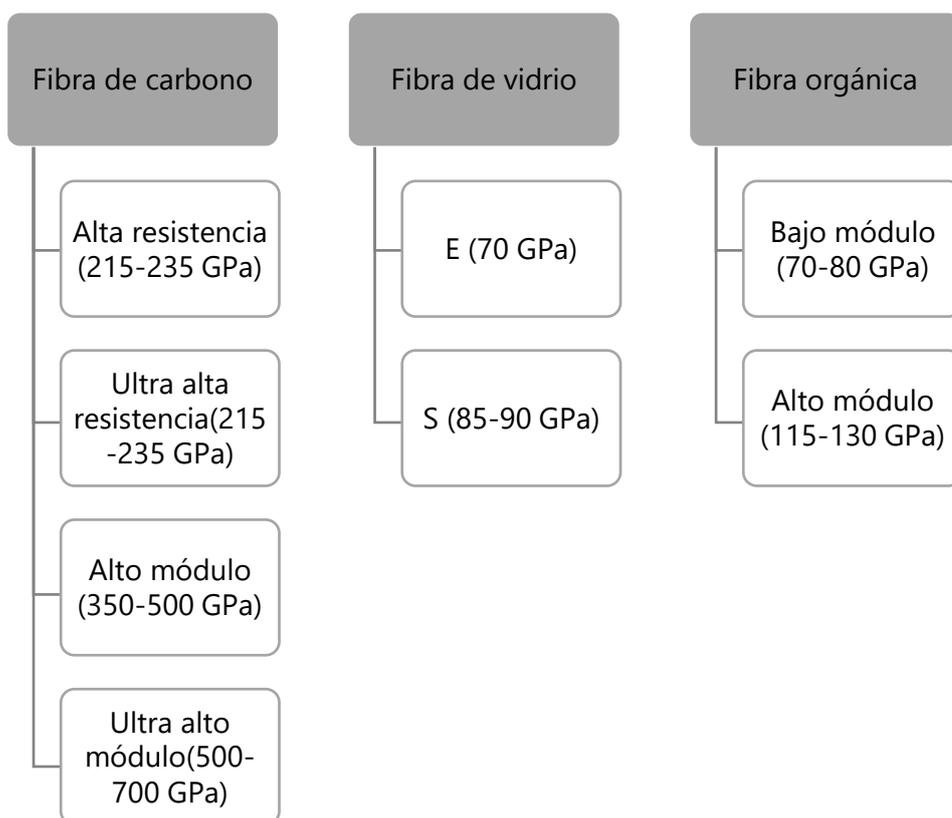
**Gráfica 20 Entrevistas realizadas**

## V RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentarán los resultados basados en nuestra revisión bibliográfica junto con un análisis sobre los diferentes tipos de fibras para determinar cuál es mejor utilizar en la construcción y siempre tomar en cuenta aspectos como el módulo de elasticidad, resistencia a la tensión, deformación última a la tensión, mecánica de adherencia, entre otros.

### 5.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad de un material es una medida de su flexibilidad o rigidez ya que indica cómo un material se deforma al someterse a una fuerza y cuánto puede recuperar su forma original después de que se elimine esa fuerza. Los materiales rígidos tienen un módulo de elasticidad más alto mientras que los materiales flexibles tienen uno más bajo.



Elaboración propia. Fuente (Institut D'estudis estructurals, 2021)

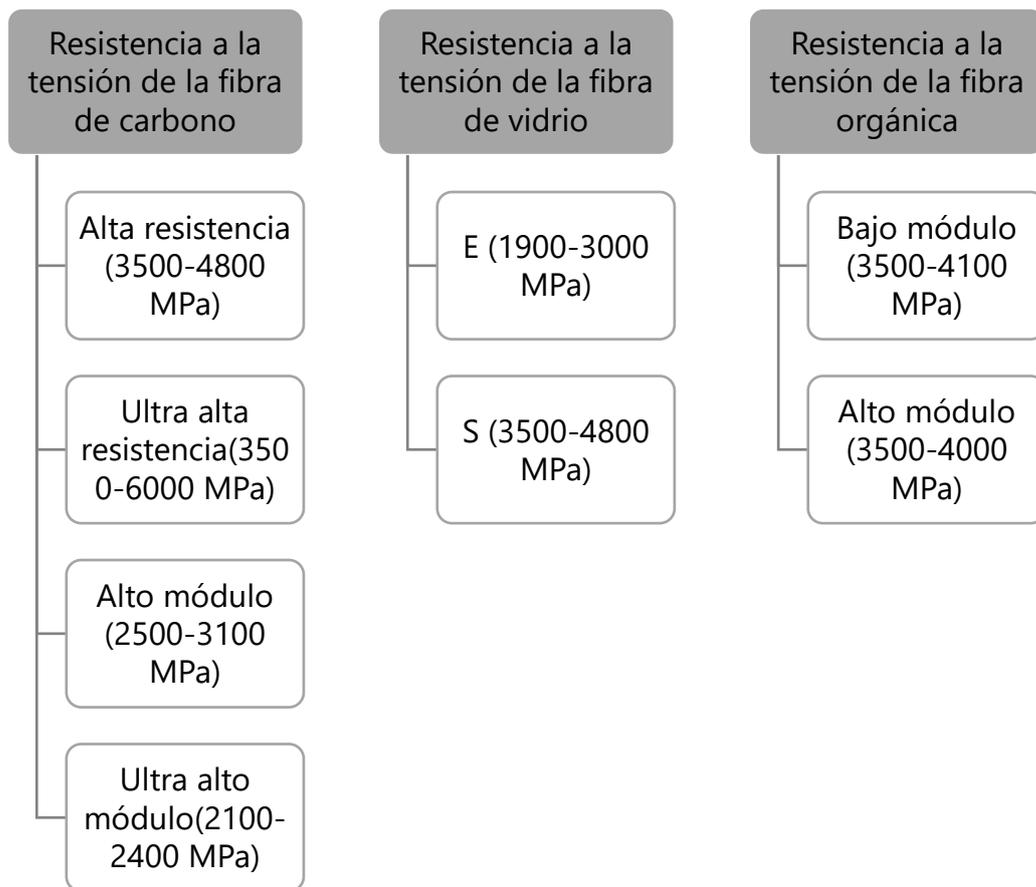
Con base en los resultados, la fibra de carbono, en este caso la fibra de carbono de ultra alto módulo, muestra un módulo de elasticidad más alto en comparación con la fibra de vidrio y la fibra orgánica, propia para uso en estructuras de concreto que requieren alta rigidez.

De lo anterior (Jiménez & Villanueva, 2023) con base en la información de fuentes primarias y secundarias orientada a determinar el módulo de elasticidad la fibra de carbono de ultra alto módulo es conocida por su excepcional rigidez y resistencia. El módulo de elasticidad más alto en comparación con la fibra de vidrio y la fibra orgánica indica que la fibra de carbono UHMCF tiene una mayor capacidad para resistir deformaciones elásticas bajo carga, lo que la hace especialmente adecuada para usos que requieren alta rigidez, como en estructuras de concreto.

Los resultados obtenidos revelan que la fibra de carbono, especialmente la variedad de ultra alto módulo, demuestra un módulo de elasticidad superior en comparación con las fibras de vidrio y orgánicas. Este impacto tiene implicaciones cruciales en la selección de materiales para estructuras de concreto que demandan una alta rigidez. La fibra de carbono, al poseer un módulo de elasticidad más elevado, confiere al concreto propiedades mecánicas superiores, esto proporciona una mayor resistencia a las tensiones y una mayor capacidad de carga. Este resultado refuerza la importancia de la fibra de carbono, especialmente la variante de ultra alto módulo, para usos en construcciones donde la rigidez estructural es fundamental. La comprensión de estas diferencias en los módulos de elasticidad entre distintos tipos de fibras permite una toma de decisiones más informada en la ingeniería de materiales para la construcción, así ayuda con la eficiencia y durabilidad de las estructuras de concreto en diversos contextos.

## **5.2 RESISTENCIA A LA TENSIÓN**

La resistencia a la tensión es la capacidad de un material para resistir la fuerza o la tracción que intenta estirarlo o alargarlo.



Elaboración propia. Fuente: (Institut D'estudis estructurals, 2021)

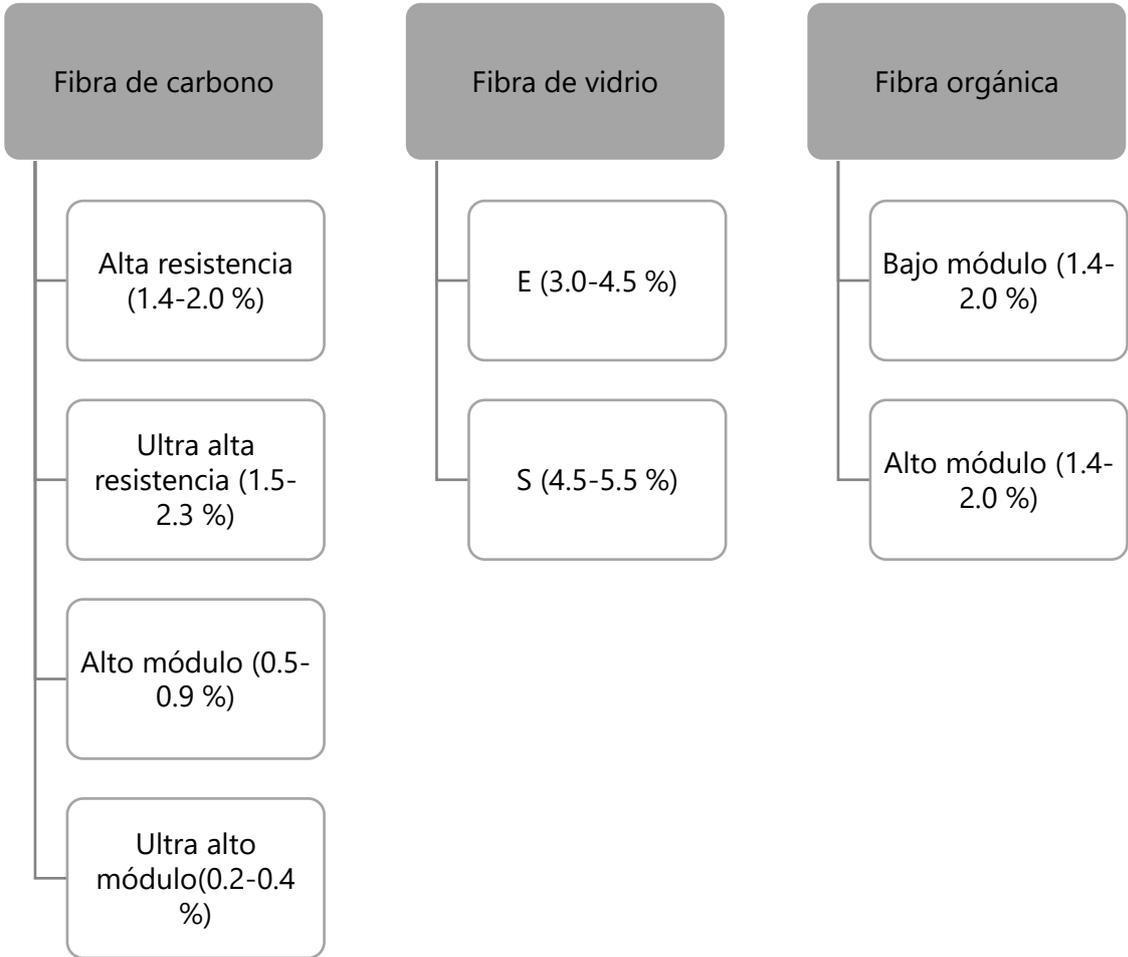
Con base en los resultados, la fibra de carbono, en este caso la fibra de carbono de ultra alto resistencia, muestra mayor resistencia a la tensión en comparación con los demás tipos de fibra de carbono, la fibra de vidrio y la fibra orgánica, propia para uso en estructuras de concreto que requieren resistencia a la tensión.

De lo anterior (Jiménez & Villanueva, 2023) con base en la información de fuentes primarias y secundarias orientada a determinar la resistencia a tensión, la fibra de carbono UHMCF generalmente exhibe una excelente resistencia. La fibra de carbono en general tiene una resistencia a la tracción excepcional, y la variedad de ultra alto módulo probablemente tenga propiedades superiores en este aspecto. Esto significa que la fibra de carbono UHMCF puede soportar fuerzas de tensión significativas antes de ceder o romperse.

En comparación con alternativas como la fibra de vidrio y la fibra orgánica, la fibra de carbono, especialmente la variedad de ultra alto rendimiento, demuestra una resistencia a la tensión superior. El resultado destaca su capacidad para el uso en estructuras de concreto que requieren una resistencia a la tracción. En este caso, la fibra de carbono es preferida debido a sus características únicas, como su ligereza y alta resistencia, estos atributos la convierten en una opción útil para optimizar estructuras y mejorar la eficiencia en el uso de materiales. El término "ultra alto rendimiento" hace referencia a posibles avances tecnológicos o modificaciones en la composición de la fibra, y su uso en el diseño estructural podría permitir una reducción del peso total sin comprometer la calidad del material.

**5.3 DEFORMACIÓN ÚLTIMA A LA TENSIÓN**

La deformación última a tensión de los polímeros indica el punto en el cual el material experimenta la máxima deformación antes de romperse o fallar bajo la aplicación de una fuerza de tracción.



Elaboración propia. Fuente: (Institut D'estudits estructurals, 2021)

Con base en los resultados, la fibra de carbono, en este caso la fibra de carbono ultra alto módulo) muestra una deformación última a tensión baja en comparación con la fibra de vidrio y fibra orgánica, pero su alta resistencia a la tracción la hace ideal para usos donde se requiere un material fuerte y liviano que pueda soportar cargas de tracción significativas sin deformarse o romperse.

De lo anterior (Jiménez & Villanueva, 2023), con base en la información de fuentes primarias y secundarias orientada a determinar que la fibra de carbono, en particular la variedad de ultra alto módulo, exhibe una deformación última a tensión relativamente baja en comparación con la fibra de vidrio y la fibra orgánica. Aunque este material presenta una mayor susceptibilidad a la deformación bajo tensiones elevadas, su destacada resistencia a la tracción lo convierte en una elección sobresaliente para usos donde se requiere un equilibrio completo entre fortaleza y peso ligero. En comparación con la fibra de vidrio, la fibra de carbono puede mostrar una menor deformación última a tensión, pero su alta resistencia la hace apta para sectores como la aeroespacial, la industria automotriz y la fabricación de equipos deportivos. Estas propiedades hacen que la fibra de carbono sea preferida en la construcción de componentes estructurales, como alas de aviones, chasis de automóviles, raquetas de tenis y otros usos donde se busca un material fuerte y liviano capaz de resistir cargas significativas de tracción sin experimentar deformación o fallo.

#### **5.4 TIPOLOGÍA DE LA FIBRA DE CARBONO**

(Jiménez & Villanueva, 2023) mencionan que cada formato o tipología de fibra de carbono presenta ventajas específicas según las necesidades estructurales.

Laminados: Presentan ventajas como la orientación controlada de las fibras para una resistencia direccional óptima, un formato constante y preconfigurado desde la factoría, para

garantizar consistencia y que puede adaptarse a formas especiales según las necesidades del proyecto.

Las barras tienen ventajas como la configuración en forma de barra que permite trabajar a tracción de manera similar a las barras de acero, así como la consistencia en contenido de fibras y disposición lineal debido a la fabricación en factoría y que es efectivo para usos donde las barras de fibra de carbono son más prácticas y fáciles de instalar que otros formatos.

Al hablar de las mechas, estas presentan ventajas al proporcionar anclajes por empotramiento, útiles en situaciones donde no es posible anclar por prolongación recta o envoltura completa y que son especialmente eficaces para reforzar secciones a flexión o cortante.

Y al mencionar por último los tejidos son muy importantes pues tienen flexibilidad en la disposición de las fibras, esto permite configuraciones unidireccionales, bidireccionales o multidireccionales, también presentan adaptabilidad a configuraciones geométricas más complejas debido a la capacidad de embeberse en la matriz polimérica durante la colocación en obra.

Es por eso por lo que (Jiménez & Villanueva, 2023) concluyen que la elección del formato dependerá de las características particulares del proyecto, como la geometría de la estructura, los tipos de esfuerzos a los que estará sometida y las preferencias de fabricación. Cada formato ofrece soluciones especializadas para mejorar la resistencia y durabilidad de las estructuras mediante el uso eficiente de la fibra de carbono.

**Tabla 2 Tipología de fibra de carbono**

<b>Tipología</b>	<b>Tipo de refuerzo</b>	<b>Sistema de colocación</b>	<b>Elemento a Reforzar</b>
Laminados	Refuerzo a flexión	Adherido / Anclado	Elementos lineales
	Refuerzo a cortante	Adherido	Elementos lineales
Tejidos	Refuerzo a flexión	Adherido	Elementos donde geometría es no lineal
	Refuerzo a cortante	Adherido	Vigas, muros

	Refuerzo por confinamiento	Adherido	Pilares, muros, silos
Barras	Refuerzo a flexión	Anclado	Elementos lineales
	Refuerzo a cortante	Anclado	Elementos lineales
Mechas	Refuerzo por tracción	Adherido / Anclado	Elementos lineales

Elaboración Propia. Fuente: (Solis, 2015)

Desde la revisión detallada y completa de los refuerzos que cumple la fibra de carbono (Jiménez & Villanueva, 2023) mencionan que cuando se trata de compresión, la fibra de carbono puede doblar la cantidad de fuerza que resiste una columna antes de fallar y cumple con la hipótesis que es capaz de mejorar en gran medida el rendimiento de un material que es sometido a fuerzas.

En cuanto a la adherencia (Jiménez & Villanueva, 2023) concluyen que la fibra además es fácil y rápida de colocar, lo que permite que los reforzamientos se hagan en poco tiempo.

De la investigación detalla (Jiménez & Villanueva, 2023) mencionan que la fibra de carbono tiene una gran ventaja en comparación con las técnicas tradicionales de reforzamiento pues el uso del polímero se destaca por su capacidad para ocupar poco espacio en comparación con los materiales tradicionales, además de su bajo peso. Su bajo grosor y alta resistencia permiten la creación de estructuras más delgadas y ligeras sin comprometer la integridad estructural. Esto es algo importante y particularmente útil para aplicaciones en las que el espacio es limitado o crucial.

De las propiedades mecánicas de la fibra de carbono, específicamente de la estructura molecular de las fibras de carbono, que se compone de fibras delgadas y ligeras con una alta relación resistencia y peso, (Jiménez & Villanueva, 2023) mencionan que esto

contribuye a la alta estabilidad dimensional y baja expansión térmica en términos de alargamiento de la estructura y que esto evita que las estructuras reforzadas con fibra de carbono se alarguen a lo largo del tiempo, con sus mismas dimensiones en diferentes condiciones ambientales.

De los retos relacionados con el Distrito Central utilizando la fibra de carbono, (Jiménez & Villanueva, 2023) concluyen que, en el Distrito Central de Honduras, la falta de conocimiento generalizado sobre la fibra de carbono como material de refuerzo en construcción ha resultado en oportunidades perdidas. A través de investigaciones y entrevistas, se revela un preocupante desconocimiento entre ingenieros estructurales, contratistas y la población en general. La falta de capacitación en el uso de la fibra de carbono limita su aplicación en proyectos de construcción, a pesar de sus beneficios, como mayor resistencia, durabilidad y rapidez de instalación. Esta falta de adopción coloca a la industria local en desventaja frente a competidores internacionales y países vecinos y deja sin aprovechar inversiones y proyectos sostenibles. Además, es relevante destacar que, aunque se han propuesto iniciativas para reforzar estructuras con fibras de carbono en el Distrito Central, como el caso del Hotel Hyatt Place, pero hasta ahora, estas propuestas no se han llevado a cabo, subrayando la necesidad crítica de acción inmediata para impulsar la innovación y competitividad en la industria de la construcción local.

## VI CONCLUSIONES

La revisión detallada de la literatura sobre el refuerzo de estructuras de concreto con fibras de carbono proporciona una visión completa y actualizada de esta tecnología innovadora para la Ingeniería Civil. La evidencia respalda la eficacia de las fibras de carbono para mejorar las propiedades mecánicas, durabilidad y resistencia estructural del concreto, así como la capacidad para aumentar la tenacidad y resistencia a la flexión, confinamiento y cortante. Se resalta la importancia de considerar la orientación de las fibras de carbono, la cuantía del refuerzo y las técnicas de instalación para maximizar los beneficios. La revisión aborda diversos tipos de fibras, con una visión completa de las opciones disponibles y respectivos usos. A pesar de los resultados favorables de la investigación, se subraya la necesidad de investigaciones a largo plazo para medir el comportamiento de las estructuras reforzadas con fibras de carbono. También se destaca la importancia de abordar problemas potenciales en el uso de la fibra de carbono, como la adhesión, durabilidad por efecto ambiental y costos asociados, para implementar con éxito esta tecnología.

1. Según el procedimiento establecido para la investigación de las propiedades mecánicas de las fibras de carbono, en relación con la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la capacidad de deformación, se ha logrado evaluar el rendimiento aislado e incluso integrar las fibras de carbono de manera efectiva en matrices de concreto. Se ha demostrado que la fibra de carbono de ultra alta resistencia es la que ofrece la mayor capacidad de resistencia a la tensión con un rango de 3500 a 6000 MPa. La fibra de carbono de ultra alta resistencia como refuerzo es altamente efectivo para aumentar la resistencia y ductilidad de las estructuras, lo que optimiza el comportamiento ante cargas estáticas y dinámicas. La investigación ha demostrado que las fibras de carbono son materiales que se utilizan para rehabilitar estructuras de concreto reforzado con el propósito de aumentar la capacidad de carga y durabilidad de vigas, columnas y pilares, debido a la combinación única de resistencia, rigidez y tenacidad.
2. El análisis de los métodos para el uso de fibras de carbono para estructuras de concreto compila diferentes fuentes de investigación que demuestran un panorama dinámico para la Ingeniería Estructural, caracterizado por la constante innovación. La amplia gama de técnicas disponibles permite una gran adaptabilidad para las necesidades y condiciones de cada proyecto, que van desde enfoques tradicionales hasta complejos

sistemas de refuerzo, variedad de opciones que permite a los ingenieros estructurales elegir el método que satisfaga el cumplimiento de las especificaciones técnicas para cada proyecto, según las normativas del ACI ya que el CHOC todavía no contempla la fibra de carbono.

3. La evaluación de las ventajas y desventajas del uso de las fibras de carbono como alternativa para refuerzo y rehabilitación de estructuras de concreto, en comparación con otras técnicas de refuerzo, como acero, muros pantalla o encamisados, es crucial en proyectos de construcción. Las fibras de carbono destacan por la ligereza, alta resistencia y durabilidad, son ideales para reducir el peso estructural y mejorar la eficiencia. No obstante, enfrentan desafíos como costos para la fabricación y vulnerabilidad a efectos externos. Aunque el acero de refuerzo puede representar una ventaja en costos, es susceptible a la corrosión y la estructura de concreto resulta de mayor peso. Otras técnicas, como muros pantalla o encamisados, ofrecen soluciones específicas, pero tienen limitaciones en flexibilidad y aplicabilidad general. La elección entre fibras de carbono y otras opciones depende de factores como las necesidades del proyecto, condiciones ambientales, presupuesto, durabilidad y carga estructural, por lo que se requiere de un análisis inclusivo para la toma de decisiones.
4. La revisión bibliográfica de casos exitosos en el uso de refuerzo con fibras de carbono en proyectos de construcción muestra una tendencia cada vez mayor en el uso de esta tecnología, desde puentes hasta estructuras de gran altura, por lo que se ha demostrado la eficacia de las fibras de carbono. En América Latina, específicamente en Perú, se encuentran documentados proyectos destacados como la restauración de puentes históricos y la construcción de estructuras estratégicas, en los que el uso de fibras de carbono ha demostrado una mejora significativa en la resistencia estructural, por ejemplo, en la rehabilitación de una columna circular de la estructura que soporta un tren eléctrico.
5. Analizar normas particulares como FIB 2007, Eurocódigos CEN y ACI 440.3R-04 ha resultado esencial para el éxito de la investigación, por lo que, dado el uso en los proyectos a nivel mundial, es importante incluir el estudio de las fibras de carbono, así como la implementación de regulaciones para definir un marco normativo para Honduras en concordancia con los estándares internacionales, de manera que se implementen diseños de menor costo sin afectar las exigencias estructurales.

6. El uso de refuerzo con fibra de carbono, tal como lo demuestra el caso del edificio "Cube" en Alemania, reduce en un 50% las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con el concreto reforzado, lo que demuestra la importancia de considerar tanto los aspectos económicos como ambientales. A pesar de que las fibras de carbono pueden requerir una inversión inicial mayor, el efecto del peso de la estructura podría compensar el costo. Es fundamental abordar la huella de carbono asociada con la producción de fibra de carbono y realizar un análisis del ciclo de vida, desde la extracción de la materia prima hasta la demolición de la estructura. Quedan demostrados los avances tecnológicos en materia del uso de materiales alternativos para la construcción, que aportan un elemento importante como la sostenibilidad.

## VII RECOMENDACIONES

1. Poner en práctica los hallazgos de la investigación, orientados a demostrar las propiedades mecánicas de las fibras de carbono en el diseño y rehabilitación de estructuras de concreto, dadas las características específicas del concreto reforzado con acero como la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la capacidad de deformación. Existe documentación del uso de fibras de carbono en vigas, columnas y pilares, con pruebas significativas de mejorar la resistencia a la compresión en estructuras existentes, aportar a la ductilidad de nuevas estructuras y superar la adherencia al concreto.
2. Ampliar el análisis del uso de fibras de carbono como refuerzo de estructuras de concreto a barras, que permiten trabajar a tracción, tejidos, que permiten mayor flexibilidad y mechas, que son utilizadas como anclajes de manera que se puedan comparar las propiedades con estructuras laminados de fibra de carbono, con el propósito de incluir en las normativas de Honduras la fibra de carbono para el uso en función de los requerimientos estructurales.
3. Realizar un análisis de las fibras de carbono en comparación con otros métodos de refuerzo, como el acero, muros pantalla o encamisados, para determinar, por medio de investigación bibliográfica cuales son las recomendaciones para utilizar la fibra de carbono como alternativa estructural, en función de las condiciones ambientales, presupuesto y durabilidad.
4. Tomar en consideración la experiencia de la tecnología de la fibra de carbono en Latinoamérica, a partir de proyectos como la Torre Chocavento y la estructura del tren eléctrico de Lima, ambos construidos en Perú; Edificio Laureano en Costa Rica y Edificio del Colegio Americano en Guatemala, para impulsar la construcción de proyectos o rehabilitación de estructuras de concreto en Honduras con uso de fibra de carbono.
5. Realizar un estudio de las normativas utilizadas para el uso de la fibra de carbono como material de construcción, tales como FIB 2007, Eurocódigos CEN y ACI 440.3R-04, de manera que sirvan de base para proponer una normativa acorde con la ingeniería estructural que predomina en Honduras de manera que sea aplicada para aprovechar las características de reducción de la masa del concreto armado, manejabilidad, almacenaje y costos.

6. Destacar los beneficios del uso de refuerzos de fibra de carbono como parte de la carrera de Ingeniería Civil, como ilustra el caso del edificio Cube en Alemania, donde se logró una reducción del 50% en las emisiones de CO2 en comparación con el concreto reforzado, logro que demuestra que esta tecnología puede utilizarse para la sostenibilidad de los proyectos de construcción, para lo que es importante tomar en consideración el ciclo de vida de los proyectos con uso de fibras de carbono, desde la extracción de materias primas hasta la demolición o desuso de una estructura.

## VIII BIBLIOGRAFÍA

- Ingeniería Mecánica PUCV. (2019). Materiales compuestos y sus aplicaciones. 10. Obtenido de <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6151/06CAPITOL3.pdf>
- ACEN International Company Limited. (2016). Obtenido de <https://es.acencarbonfibersheet.com/about-us>
- Aceros Arequipa. (2017). *Vigas de concreto armado: consejos para hacer un buen trabajo*. Obtenido de <https://www.construyendoseguro.com/vigas-de-concreto-armado-consejos-para-hacer-un-buen-trabajo/>
- ACI 318-19. (2019). *ACI 318-19: BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR STRUCTURAL CONCRETE*.
- Alfonso Recuero, J. é.-C.-M. (1997). *REFUERZO DE ESTRUCTURAS CON COMPOSITOS AVANZADOS*. Obtenido de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/87414/1/Informes%20de%20la%20Construcci%C3%B3n%2049\(452\)%2039-50%20\(1997\).pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/87414/1/Informes%20de%20la%20Construcci%C3%B3n%2049(452)%2039-50%20(1997).pdf)
- American Concrete Institute. (2021). *ACI PRC-440.1-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars*. Obtenido de [https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=4401U15&Format=PROTECTED\\_PDF&Language=English&Units=US\\_AND\\_METRIC](https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=4401U15&Format=PROTECTED_PDF&Language=English&Units=US_AND_METRIC)
- ANCLAF. (11 de Agosto de 2020). *Reforzamiento Estructural con Fibra de Carbono*. Obtenido de <https://anclaf.com/reforzamiento-estructural-con-fibra-de-carbono/>
- ASCE 7. (2005). *Formas comunes de las fallas estructurales*.
- ASOCRETO. (03 de Junio de 2022). *FALLAS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO*. Obtenido de <https://360enconcreto.com/blog/detalle/fallas-en-estructuras-de-concreto/>
- Avilés, G. (2002). *Estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de estructuras de hormigón armado mediante materiales compuestos”*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Baca, W. (2010). *Experiencia Peruana en el Diseño y Aplicación de Reforzamiento Estructural con Fibra de Carbono*.

- Barboza Mejia, R. (3 de Noviembre de 2023). *Reforzamiento estructural del edificio CCSS con fibras de carbono - Empresa Aplitec*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=EuT5UKmSGxc>
- Beltran, A. (2011). *Uso de fibras de carbono como reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado*. Bogota.
- BRS&BM Ingenieros. (07 de septiembre de 2020). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=6dDbNzC7-1k>
- C. Escrig Pérez, L. G. (junio de 2016). *Refuerzo a Cortante de Vigas de Hormigón Armado con Tejidos y Matrices Base Cemento*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/46175716.pdf>
- CDT. (13 de Marzo de 2023). *The Cube: el primer edificio de hormigón con fibra de carbono del mundo, menos emisiones CO2, más resistente y más ligero*. Obtenido de <https://www.cdt.cl/the-cube-el-primer-edificio-de-hormigon-con-fibra-de-carbono-del-mundo-menos-emisiones-co2-mas-resistente-y-mas-ligero/>
- CEN. (2022). *CEN/TC 250 - STRUCTURAL EUROCODES*. Obtenido de <https://standards.iteh.ai/catalog/tc/cen/0eef9051-739c-466a-98a4-0aca7920b9f0/cen-tc-250-sc-2-wg-2>
- Civil, F. (28 de Marzo de 2021). *Fallas y daños en estructuras de concreto*. Obtenido de <https://www.libreingenieriacivil.com/2021/03/danos-en-estructuras-de-concreto-armado.html>
- Colque, A. (2020). *Concreto reforzado con textil para el refuerzo y rehabilitación de columnas de hormigón armado*. La Paz.
- Constructor Civil. (11 de Enero de 2011). *Concreto: Resistencia a la Flexión*. Obtenido de <https://www.elconstructorcivil.com/2011/01/concreto-resistencia-la-flexion.html>
- Cruz, M., & Morales, F. (2020). *ANÁLISIS DE FALLAS ESTRUCTURALES Y COMPORTAMIENTO SÍSMICO EN LAS UNIONES VIGACOLUMNA EN PÓRTIC*.
- CSIC. (2001). *Hacia la fibra de carbono en la construcción*.

- Depaz, F. (2019). *APLICACIÓN DE FIBRA DE CARBONO CFRP EN EL REFORZAMIENTO A FLEXIÓN DE VIGAS EXPERIMENTALES DE CONCRETO ARMADO EN LA CIUDAD DE HUARAZ EN EL AÑO 2018*. Huaraz.
- Díaz, J. Á. (2016). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN DE RESISTENCIAS BAJAS Y MEDIAS CONFINADAS CON TEJIDOS DE FIBRAS DE CARBONO Y CON DEFECTOS MUY IMPORTANTES DE EJECUCIÓN*. Madrid.
- EK4, Diseño y Construcción. (Octubre de 2021). *Reforzamiento Estructural*. Obtenido de <https://ek4.com.mx/instalacion-especializada/reforzamiento-estructural-fibras-de-carbono/#:~:text=El%20sistema%20de%20reforzamiento%20con,aumentar%20hasta%20en%20un%2070%25>.
- Externally bonded FRP Reinforcement for RC structures*. (2001).
- Feldman, D. (1989). *Repair and strengthening of concrete structures*. Fédération Internationale de la Précontrainte, London, UK, Thomas Telford.
- Fernandez Flores, M. (2012). *APLICACIONES DE REFUERZOS DE ESTRUCTURAS EN BASE A FIBRAS DE CARBONO*.
- FIB Bulletin N° 90. (s.f.). *FIB Bulletin N° 90*.
- FIB Bulletin No. 40. (2007). *FRP reinforcement in RC structures*.
- FibreGlast. (2022). Obtenido de [https://www.fibreglast.com/product/Kevlar\\_Plain\\_Weave\\_Fabric\\_2469](https://www.fibreglast.com/product/Kevlar_Plain_Weave_Fabric_2469)
- Flores, L. (2012). *REFORZANDO EDIFICACIONES CON FIBRAS DE CARBONO*. Huesca.
- Funes, L. M. (6 de Diciembre de 2023). Msc. Ingeniería Estructural.
- GOMEZ, E. N. (2012). *Las fuentes en el diseño de investigación cualitativa y la investigación cualitativa*.
- Handbook, Department of Defense. (17 de Junio de 2002). *COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK VOLUME 3. POLYMER MATRIX COMPOSITES*. Obtenido de <https://cds.cern.ch/record/439501/files/HDBK17-3F.pdf>

INFINITIA. (14 de Abril de 2023). *Propiedades mecánicas*. Obtenido de <https://www.infinitiaresearch.com/laboratorio-ingenieria-industrial/propiedades-mecanicas/#:~:text=Las%20propiedades%20mec%C3%A1nicas%20de%20un,y%20resistir%20fuerzas%20o%20deformaciones>.

Institut D'estudis estructurals. (2021). *LA FIBRA DE CARBONO EN REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN*. Obtenido de <https://aceweb.cat/wp-content/uploads/2021/08/Monografico-ACE-01-Fibra-de-carbono-2aedicion.pdf>

Jiménez, C., & Villanueva, G. (2023). *Revision Bibliografica sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado con Fibras de Carbono y Soluciones Utilizadas en el Distrito Central*. Tegucigalpa.

Kim, S. (11 de Septiembre de 2018). *La fibra de carbono: ¿el superhéroe de los materiales de construcción?* Obtenido de <https://www.autodesk.com/es/design-make/articles/construccion-fibra-carbono>

Klebstoff. (12 de Octubre de 2022). Obtenido de <https://www.klebstoff.mx/permabond-et5428-adhesivo-fibra-de-carbono/>

Kustom service. (2018). *Resina epoxi transparente para fibra de carbono*. Obtenido de <https://kustomservice.com/es/resina-de-fibra-de-carbono/103-resina-epoxi-transparente-para-fibra-de-carbono-16kg.html#:~:text=Resina%20epoxi%20de%20dos%20componentes,funci%C3%B3n%20de%20la%20masa%20total>.

Lagos, R. (01 de Diciembre de 2023). Entrevista. (C. J. Gabriel Villanueva, Entrevistador)

Lazarus&Lazarus. (2021). *Adhesivos y Selladores*.

Lemara. (16 de Agosto de 2018). *¿Por qué apostar por el refuerzo estructural con fibra de carbono?* Obtenido de <https://www.lemara.es/por-que-apostar-refuerzo-estructural-fibra-carbono/>

Lemara. (19 de 02 de 2020). *¿Cómo rehabilitar una estructura de hormigón?* Obtenido de <https://www.lemara.es/como-rehabilitar-estructura-hormigon/>

Masias-Mogollon, K. (2018). *RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y TRACCIÓN EN EL CONCRETO USANDO LADRILLO TRITURADO COMO AGREGADO*.

- MasterBrace. (2008). *Sistema Compuesto de Reforzamiento*.
- Mauricio, T. (2003). LA NANOTECNOLOGÍA DEL CARBONO. *Nuevas Ciencias*, 30-39.
- Meierhofer, A. (26 de noviembre de 2020). *Software de análisis y dimensionamiento de estructuras*. Obtenido de Dlubal: <https://www.dlubal.com/es/soporte-y-formacion/soporte/base-de-conocimientos/001666>
- Mexican Fibers S.A de C.V. (20 de Mayo de 2020). *LA FIBRA DE VIDRIO EN LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE ARQUITECTURA*. Obtenido de <https://mexicanfibers.com/la-fibra-de-vidrio-en-la-construccion-y-proyectos-de-arquitectura/>
- Moncayo, M., & Rodriguez, J. (2016). Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras. 57-62.
- Pedro. (2015). *Fibra de carbono.es*. Obtenido de <https://www.fibradecarbono.es/articulos/que-es-fibra-carbono/>
- Perna, L. (07 de Diciembre de 2023). Lazarus & Lazarus.
- PITRA. (06 de OCTUBRE de 2010). *Uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como refuerzo externo de elementos de concreto de puentes en Costa Rica*. Obtenido de PROGRAMA DE INGENIERÍA EN INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE: [https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/374/06.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20pol%C3%ADmeros%20reforzados%20con%20fibras%20\(FRP\)%20es%20un%20material%20compuesto,fibras%2C%20una%20matriz%20y%20adhesivos.&text=Las%2](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/374/06.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Los%20pol%C3%ADmeros%20reforzados%20con%20fibras%20(FRP)%20es%20un%20material%20compuesto,fibras%2C%20una%20matriz%20y%20adhesivos.&text=Las%2)
- PYS Concreto. (22 de Febrero de 2022). *Conferencia Técnica: Casos de Reforzamiento y Rehabilitación de Estructuras de Concreto Armado*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=XCevJKwuonc>
- RAHI . (2022). *RAHI PERÚ*. Obtenido de <https://www.rahiperu.com.pe/properties/edificio-torre-chocavento/>
- Resiliencia Sísmica. (12 de mayo de 2022). Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=Ug7sWh35Ozk>
- Ribeco. (2015). Obtenido de <https://www.ribecosl.com/noticias/muro-pantalla-que-es>

- Rougier. (2003). Confinamiento de columnas de hormigón con materiales compuestos. P. 24-25.
- Ruiz, M., Borboa, M. d., & Rodriguez, J. (2013). EL ENFOQUE MIXTO DE INVESTIGACIÓN EN LOS ESTUDIOS FISCALES . *TLATEMOANI* , 2-25.
- Shanghai Tanchain New Material Technology . (2022 de Noviembre de 09). *Aplicación de fibra Aramida en el refuerzo de edificios*. Obtenido de <https://www.tchaintech.com/ES/NDETAIL/Application-of-Aramid-Fiber-Cloth-in-Building-Reinforcement>
- Sika. (2018). *Refuerzo a confinamiento*. Obtenido de Aumento de la capacidad de la estructura frente a esfuerzos de confinamiento o axial: <https://www.masterbrace.es/aplicacion/refuerzo-confinamiento>
- Sika. (2018). *Refuerzo a cortante*. Obtenido de Aumento de la capacidad de la estructura frente a momentos de cortante: <https://www.masterbrace.es/aplicacion/refuerzo-cortante>
- Sika. (Julio de 2018). *REFUERZO ESTRUCTURAL CON FIBRA DE CARBONO*. Obtenido de <https://www.refuerzofibradecarbono.com/>
- Sika. (2023). *SISTEMA DE REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS*. Obtenido de <https://per.sika.com/es/sistemas-constructivos/sistema-de-reparacion-de-estructuras.html>
- Sika Building Trust. (2018). Obtenido de <https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono.html>
- Solis, J. J. (2015). *ESTUDIO DEL ANCLAJE POR ADHERENCIA Y EL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DE REFUERZOS CON LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO*. Barcelona.
- Tantaleán, L. F. (10 de OCTUBRE de 2012). *REFORZANDO EDIFICACIONES CON FIBRAS DE CARBONO*. Obtenido de ZABAGLIA | Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Huesca: <https://www.riarte.es/bitstream/handle/20.500.12251/1268/ZABAGLIA%20010%20OC T-12.%20pp.%2018->

23.%20Reforzando%20edificaciones%20con%20fibra%20de%20carbono.pdf?sequence=1

Tesis y Máster. (13 de Septiembre de 2022). Obtenido de <https://tesisymasters.mx/variable-dependiente/>

Theurer, M. M. (24 de noviembre de 2016). *Las fibras de carbono como una alternativa para reforzamiento de estructuras*. Obtenido de UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL: <https://www.redalyc.org/journal/467/46750927006/html/>

TJ Reinhart et al. (1987). *Engineered Materials Handbook. Volume 1, Composite, ASM international 1987*.

Torre, G. D. (05 de Noviembre de 2019). *Evaluación y diseño de dos propuestas de reforzamiento para vigas y columnas de concreto armado en una edificación de hotel*. Obtenido de [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/628230/Guillermo\\_TA.pdf?sequence=3](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/628230/Guillermo_TA.pdf?sequence=3)

Tremco. (2 de Noviembre de 2007). *Polímeros para la Construcción, los ingredientes para un buen pastel*. Obtenido de [https://www.illbruck.com/es\\_ES/noticias/noticias/detail/polimeros-para-la-construccion-los-ingredientes-para-un-buen-pastel-1/#:~:text=En%20la%20Construcci%C3%B3n%20los%20pol%C3%ADmeros,evitar%20da%C3%B1os%20estructurales%20del%20edificio](https://www.illbruck.com/es_ES/noticias/noticias/detail/polimeros-para-la-construccion-los-ingredientes-para-un-buen-pastel-1/#:~:text=En%20la%20Construcci%C3%B3n%20los%20pol%C3%ADmeros,evitar%20da%C3%B1os%20estructurales%20del%20edificio).

Trigueros, A. (24 de marzo de 2023). Solo 40% de edificios en Honduras son a prueba de sismos. *La Prensa*, págs. <https://www.laprensa.hn/premium/edificios-en-honduras-son-a-prueba-de-sismos-HN12797176>.

U.S. Department of transportation FHA. (2017). *Reactive Solutions - An FHWA Technical Update on Alkali-Silica Reactivity*. Obtenido de <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/reactive/v03issue03.cfm>

Universidad Politecnica de Cartagena. (2007). Obtenido de [https://www.upct.es/~minaees/tema\\_19.pdf](https://www.upct.es/~minaees/tema_19.pdf)

- UPN. (2021). *Universidad Privada del Norte*. Obtenido de Análisis del desempeño estructural de la fibra de carbono empleada como reforzamiento de elementos estructurales de concreto armado: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/29811>
- Useche, M., Artigas, W., Queipo, B., & Perozo, E. (2019). *TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS CUALI-CUANTITATIVOS*. La Guajira: Editorial Gente Nueva.
- Villasis-Keveer, & Miranda-Novales. (2016). *Metodología de la investigación*. Obtenido de <https://doi.org/10.29262/ram.v63i3.199>
- Yañacc, M. (2022). *IDENTIFICACION DE LAS FALLAS Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE CONCRETO ARMADO EN EL CENTRO CULTURAL DEL DISTRITO DE HUALHUAS - HUANCAYO, 2019*.
- Zamora, R. (14 de Mayo de 2014). *Ensayo a flexión de una pieza de carbono y núcleo de espuma de aluminio*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=SXlbZRWGjig>

## IX ANEXOS

### Anexo 1 Tabla 22.5.5.1 del ACI 318-19

**Tabla 3 Tabla 22.5.5.1 del ACI 318-19**

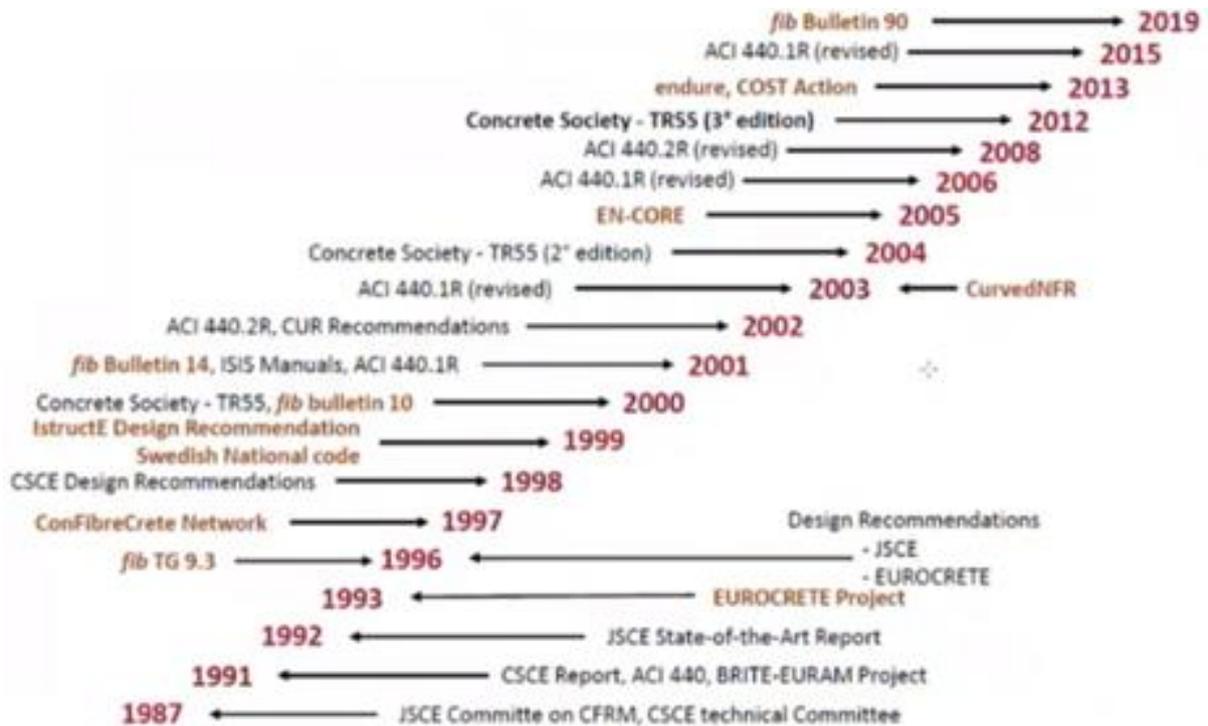
Criteria	$V_c$		
$A_v \geq A_{v,min}$	Either of:	$\left[ 2\lambda\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w d$	(a)
		$\left[ 8\lambda(\rho_w)^{1/3}\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w d$	(b)
$A_v < A_{v,min}$	$\left[ 8\lambda_s\lambda(\rho_w)^{1/3}\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right] b_w d$		(c)

Notes:

1. Axial load,  $N_u$ , is positive for compression and negative for tension.
2.  $V_c$  shall not be taken less than zero.

Fuente: (ACI 318-19, 2019)

### Anexo 2 Evolución de guías y normas para utilizar los FRP



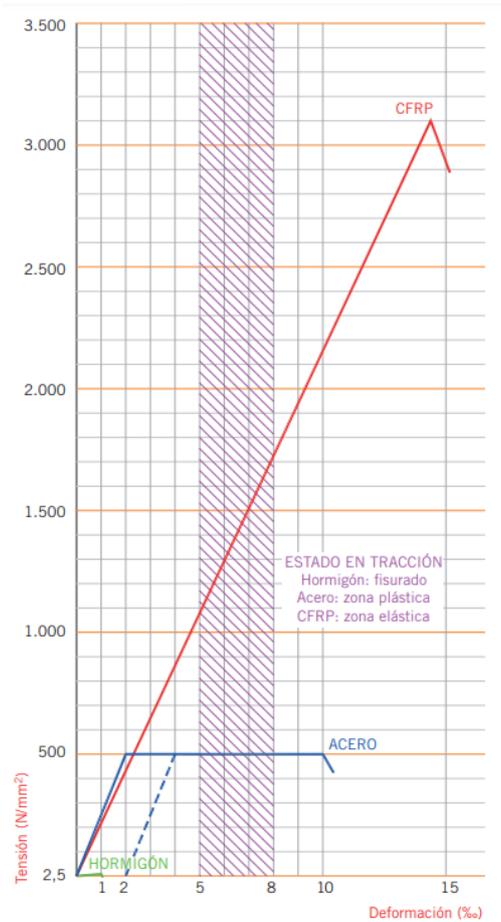
Fuente: (Díaz, 2016)

### Anexo 3 Modelos para determinar la longitud efectiva para la adherencia de los FRP

Modelo	Longitud efectiva, $L_e$
Holzenkämpfer (1994)	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{4f_{ctm}}}$
Neubauer y Rostásy (1997)	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{2f_{ctm}}}$
Chen y Teng (2001)	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_c}} *$
Monti et al (2003)	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{4\tau_{max}}}$
Teng et al (2003)	$L_e = \sqrt{\frac{E_p t_p}{f_c}} *$
Karbhari et al (2006)	$L_e = \frac{P_{max}}{b_p \tau_{max} / 2} = \frac{2b_p \sqrt{2G_p E_p t_p}}{b_p \tau_{max}} \approx \frac{0.6485 \sqrt{E_p t_p}}{f_c^{0.095}}$

Fuente: (Solis, 2015)

### Anexo 4 Diagrama tensión/deformación concreto -acero-CFRP



Fuente: (Institut D'estudis estructurals, 2021)

## Anexo 5 Asesoría temática 1

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: <u>1</u>
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Asesoramiento teórico con la elección del proyecto, donde se explicó	
2	paso a paso cada una de las partes que podía contener dicho	
3	proyecto,	
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
FIRMA DEL ASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>09/10/2023</u>

## Anexo 6 Asesoría temática 2

### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: <u>2</u>
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Apoyo con la elección de los temas asociados con el marco teórico	
2.	de nuestra investigación, así mismo explicó por qué la elección de	
3.	estos temas.	
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
FIRMA DELASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>15/10/2023</u>

### Anexo 7 Asesoría temática 3

#### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: <u>3</u>
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Asesoramiento, correcciones y mejoramiento de la estructura del	
2.	informe de investigación.	
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
FIRMA DELASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>23/10/2023</u>

## Anexo 8 Asesoría temática 4

### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: <u>4</u>
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Agregar las normas y regulaciones que rigen la aplicación del tema	
2.	que se esta tratando en la investigación ya que es de suma	
3.	Importancia agregar todos estos entes reguladores.	
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
FIRMA DELASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>01/11/2023</u>

## Anexo 9 Asesoría temática 5

### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: <u>5</u>
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Revisión de las fuentes bibliográficas documentadas en el proyecto	
2.	de investigación para comprobar la procedencia correcta.	
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
FIRMA DELASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>03/10/2023</u>

## Anexo 10 Asesoría temática 6

### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: 6
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Asesoramiento con la correcta escritura del resumen ejecutivo e	
2.	Introducción del documento para presentar el artículo en alguna	
3.	Revista y no lleve ningún tipo de error.	
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
FIRMA DELASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>09/10/2023</u>

## Anexo 11 Asesoría temática 7

### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: <u>7</u>
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Apoyo con material importante para corregir y agregar información	
2.	Valiosa y de excelente fuente para enriquecer la parte del marco	
3.	Teórico y metodología de la investigación.	
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
FIRMA DELASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>09/10/2023</u>

## Anexo 12 Asesoría temática 8

### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

#### NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

#### INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: 8
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Correcciones en el marco teórico específicamente en los sub temas	
2.	Principales donde carecían de información valiosa como datos,	
3.	Gráficas y menciones importantes para entender mejor de lo que se	
4.	Menciona.	
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
FIRMA DELASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>09/10/2023</u>

## Anexo 13 Asesoría temática 9

### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO	Nº: <u>9</u>
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes	
1. Ayuda con la formulación de las conclusiones y recomendaciones	
2. que lleva el documento conforme a lo que es una revisión	
3. Bibliográfica.	
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	
FIRMA DELASESOR	SEIIO
	Fecha: <u>09/10/2023</u>

## Anexo 14 Asesoría temática 10

### ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Revisión Bibliográfica Sobre Reforzamiento de Estructuras de Concreto Reforzado Con Fibras de Carbono Y Soluciones Utilizadas en El Distrito Central

---

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Cristhiam Alexis Jimenez Vargas	11911047
Gabriel Adolfo Villanueva Ordoñez	11741036

ASESORAMIENTO		Nº: <u>10</u>
ASESOR: Ing. Víctor Alonso Martínez Reyes		
1.	Revision de las correcciones anteriores para comprobar que todo el	
2.	Documento lleve los aspectos importantes en cada sub tema.	
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
FIRMA DELASESOR		SEIIO
		Fecha: <u>15/12/2023</u>

## Anexo 15 Ficha técnica Lazarus&Lazarus para uso de macrofibras

# TUF - STRAND SF

Fibras sintéticas estructurales

### Descripción

**TUF - STRAND SF** son fibras sintéticas estructurales mezcla de polipropileno / polietileno, monofilamento, las cuales se auto fibrilan cuando se incorporan en la mezcla de concreto, utilizadas exitosamente para reemplazar la malla electrosoldada y las fibras metálicas en una amplia variedad de aplicaciones.

Las fibras **TUF - STRAND SF** cumplen con la norma ASTM C-1116, para el tipo III (Syntetic Fiber - Reinforced Concrete o Shotcrete). Especificación para concreto y concreto lanzado reforzado con fibra, y están diseñadas específicamente para proveer una resistencia a la tensión equivalente a la de los refuerzos convencionales.

El concreto reforzado con **TUF - STRAND SF** tiene un reforzamiento tridimensional con incremento de la tenacidad a la flexión, la resistencia a la abrasión y al impacto. También ayuda a reducir la formación de fisuras por retracción plástica en el concreto.

Las macrofibras sintéticas cumplen con las partes aplicables del International Code Council (ICC), criterio de aceptación AC 308 para fibras sintéticas, tienen certificación UL para uso en construcción de sistemas metaldeck y son reconocidas por ACI 308 R-06 y SDI / ANSI C10 como alternativas al reforzamiento con malla electrosoldada.

### Información Técnica

#### PROPIEDADES FISICAS

Material : Mezcla de Polipropileno / polietileno  
Gravedad Especifica : 0.92  
Resistencia a Tensión : 600 - 650 MPa (87 - 94 Ksi)  
Módulo de elasticidad : 9.5 GPa (1,388 Ksi)  
Punto de llama (ASTM D-1929) : 330°C (625°F)  
Longitud de fibra : 50 mm (2")  
Aspect Ratio : 74  
Color : Blanco  
Absorción de agua : Despreciable  
Resistencia a álcalis : Excelente  
Resistencia a ácidos : Excelente  
Resistencia a moho - hongos : Excelente  
Dosis típica : 1.8 - 12 kg/m<sup>3</sup>  
Denier : 3000

### Usos

- Elementos prefabricados en concreto.
- Concreto lanzado (recubrimiento de túneles, construcción de piscinas, estabilización de taludes).
- Pavimentos y Whitetopping
- Pisos de concreto en centros de distribución, pisos industriales, pisos de bodegas.

### Ventajas

- Controla y mitiga la retracción y fisuración por retracción plástica, reduce la segregación y la exudación.
- Da un control tridimensional de la contracción plástica.
- Reduce el contenido de fibra y optimiza el espesor comparado con las fibras metálicas para aplicación de concreto lanzado.
- Excelente dispersión en concreto.
- Reduce el deterioro de equipos.
- Reduce el rebote del concreto lanzado cuando se compara con fibras de acero y otras fibras sintéticas.

#### OFICINA PRINCIPAL:

Calle 20C Nº 43A - 52 Int. 4 Bogotá - Colombia  
TEL: (57) 200 86 00 • FAX: (57) 200 85 00 Ext. 133  
[WWW.TOXEMENT.COM.CO](http://WWW.TOXEMENT.COM.CO)



EUCLID GROUP  
TOXEMENT

ADITIVOS

TUF - STRAND SF

TX40T231

Ilustración 60 Ficha técnica para uso de macrofibras

# TUF - STRAND SF

Fibras sintéticas estructurales

- TUF - STRAND SF ha sido probada de acuerdo con ASTM C-1399, C-1550, C-1609 y C-1018 y EFNARC (Experts for Specialized Construction and Concrete Systems).
- Aplican los criterios de diseño considerados en ACI 360 R-06, capítulo 10.
- Certificación de uso UL / ULC para ensambles de metaldeck D900 series, como alternativa al uso de malla electrosoldada.
- Resistente a corrosión, no es magnética, no es un refuerzo estructural conductible.
- Reduce costos de colocación si se compara con la malla electrosoldada.
- Fácil de usar y puede ser adicionada a la mezcla de concreto en cualquier momento antes de la colocación.

ADITIVOS

## Dosificación

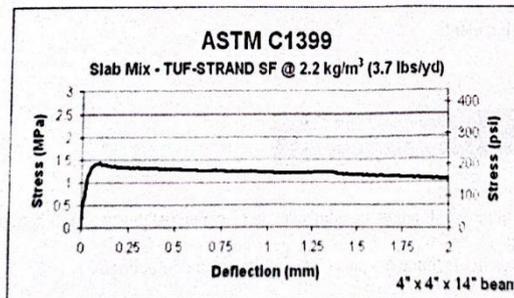
TUF - STRAND SF puede ser adicionado al concreto en un rango de 1.8 - 12 kg/m<sup>3</sup> dependiendo de la aplicación y requerimientos del diseño de mezcla.

Para establecer la cantidad de TUF - STRAND SF necesaria para reemplazar la malla electrosoldada en una aplicación específica, consulte al Departamento Técnico de TOXEMENT.

## Aplicación

- Las fibras TUF STRAND SF se pueden adicionar a la mezcla de concreto en cualquier momento antes de la colocación del concreto. Generalmente se recomienda adicionar la fibra en la planta de producción del concreto.
- Una vez adicionadas las fibras al concreto, se debe mezclar por un mínimo de 3 a 5 minutos a la máxima velocidad para asegurar la completa dispersión y homogeneización de las fibras en la mezcla.
- Para dosificaciones de 2 - 3 kg/m<sup>3</sup> se puede preveer un asentamiento de 50 mm (2"). Para dosificaciones de 3 a 7 kg/m<sup>3</sup> se puede esperar una pérdida de asentamiento de 75 a 125 mm (3 a 5 in).
- Para mantener la trabajabilidad deseada puede ser necesario usar aditivos reductores y/o plastificantes tales como EUCON 37, EUCON 1037 o aditivos de la serie PLASTOL.
- Adicione los aditivos de manera independiente a las fibras TUF STRAND SF.
- TUF STRAND SF es compatible con todos los aditivos de TOXEMENT.
- El uso apropiado de las fibras TUF STRAND SF no afecta la resistencia a la compresión o a la flexión del concreto o del concreto lanzado.

TUF - STRAND SF



Average Residual Strength (ARS) at given deflection					
deflection	0.5 mm	0.75 mm	1 mm	1.25 mm	Average
ARS - MPa	1.29	1.24	1.21	1.19	1.23
ARS - psi	187	180	176	172	179

single test analysis - individual results may vary

TX40T231

### OFICINA PRINCIPAL:

CALLE 13 N° 436 - TORRE 4 - BOGOTÁ - COLOMBIA

Tel: (+57) 208 86 00 • FAX: (+57) 208 86 01

WWW.TOXEMENT.COM.CO

EUCLID GROUP



EUCLID GROUP  
TOXEMENT

Ilustración 61 Ficha técnica de la aplicación de la macrofibra



Anexo 16 Ficha técnica de las microfibras de Lazaros & Lazaros

The Euclid Chemical Company

# PSI FIBERSTRAND MULTI-MIX 80

POLYPROPYLENE MICRO-FIBER



EUCLID CHEMICAL

FIBER PRODUCTS

PSI FIBERSTRAND MULTI-MIX 80

MASTER FORMAT #:  
03 24 00

---

**DESCRIPTION**

PSI FIBERSTRAND MULTI-MIX 80 is a fine denier monofilament polypropylene micro-fiber for concrete reinforcement that complies with ASTM C 1116, Standard Specification for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete, and is specifically designed to help mitigate the formation of plastic shrinkage cracking in concrete. Typically used at a dosage rate of 0.5 lb/yd<sup>3</sup> (0.3 kg/m<sup>3</sup>), PSI FIBERSTRAND Multi-Mix 80 micro-fibers will greatly reduce plastic shrinkage cracking when compared to plain concrete. PSI FIBERSTRAND Multi-Mix 80 micro-fibers also comply with applicable portions of the International Code Council (ICC) Acceptance Criteria AC308 for synthetic fibers.

---

**PRIMARY APPLICATIONS**

- Flatwork for industrial, commercial and residential concrete projects
- Footings, foundations, walls and tank applications
- Stucco, concrete pipe, vault structures and pre-cast / pre-stressed beams
- Shotcrete

---

**FEATURES/BENEFITS**

- Controls and mitigates plastic shrinkage cracking
- Reduces segregation and bleed-water
- Provides three-dimensional reinforcement against micro-cracking
- Increases surface durability, impact and abrasion resistance
- Reduction of in-place cost versus wire mesh for non-structural temperature / shrinkage crack control
- Easily added to concrete mixture at any time prior to placement

---

**TECHNICAL INFORMATION**

<b>Typical Engineering Data</b>	
Material.....	100% virgin monofilament polypropylene
Specific Gravity.....	0.91
Typical dosage rate.....	0.5 lbs/yd <sup>3</sup> (0.3 kg/m <sup>3</sup> )
Available lengths.....	¼" (6 mm), ½" (13 mm)
Melt point.....	320°F (160°C)
Electrical and Thermal Conductivity.....	low
Water Absorption.....	negligible
Acid and Alkali Resistance.....	excellent

---

**PACKAGING**

PSI FIBERSTRAND Multi-Mix 80 micro-fibers are packaged in 0.5 lb (0.23 kg), 1.0 lb (0.45 kg) and 1.5 lb (0.68 kg) water soluble bags. Special packaging configurations are also available upon request.

---

**SHELF LIFE**

3 years in original, unopened package.

---

**DIRECTIONS FOR USE**

PSI FIBERSTRAND Multi-Mix 80 fibers can be added to the concrete mixture at any time prior to placement of the concrete. It is generally recommended to add any fiber material to the concrete mixer during batching. Fibers must be mixed with concrete for a minimum of three to five (3-5) minutes at maximum mixing speed, depending upon the mixer type, to ensure complete dispersion and uniformity.

---

19215 Redwood Road • Cleveland, OH 44110

www.euclidchemical.com

Ilustración 63 Ficha técnica de la microfibra

## CLEAN-UP

Loose fiber material may be disposed in proper receptacles for refuse. Finishing equipment with fibers embedded in concrete should be thoroughly cleaned.

## PRECAUTIONS/LIMITATIONS

- Use of fibers may cause an apparent loss in measured slump of concrete. This may be offset with the use of a water reducing admixture if necessary.
- Fibers should never be added to a "zero-slump" concrete. Ensure a minimum concrete slump of 3" (80 mm) prior to addition of any fiber material. Fibers may also be added in loose form to aggregate charging devices.
- In all cases, consult the Safety Data Sheet before use.

### Ilustración 64 Precauciones de la ficha técnica para la microfibra

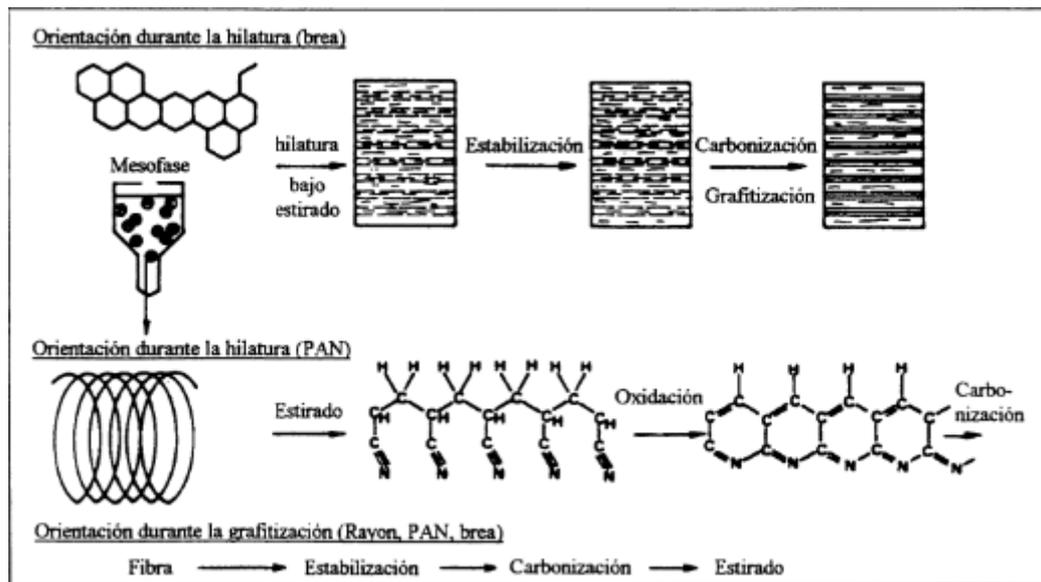
#### Anexo 17 Macrofibra de Lazarus&Lazarus



#### Anexo 18 Microfibra de Lazarus&Lazarus



## Anexo 19 Esquema de carbonización



Fuente: (CSIC, 2001)

## Anexo 20 Especificaciones técnicas fibra de carbono de MBrace

Tabla 4 Especificaciones técnicas fibra de carbono

**MBrace®**  
Guía de Selección

TIPO DE REFUERZO	SISTEMA DE RESINA	APLICACIONES							AMBIENTES DE APLICACIÓN		
		Refuerzo a Flexión del Concreto	Rigidización a Flexión del Concreto	Refuerzo a Compresión del Concreto	Confinamiento del Concreto para Refuerzo Anel	Confinamiento del Concreto para Adhesión Sismica	Refuerzo de Paredes de Mampostería	Refuerzo de Techos, Tuberías y Recipientes de Acero	Instalación en Bajas Temperaturas 0°C a 10°C	Instalación en Altas Temperaturas 50°C a 70°C	Alto Desgaste por Abrasión
MALLA	MBrace® CF 130	Standard	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		LTC	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	MBrace® CF 160	Satandard	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		LTC	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	MBrace® CF 530	Standard	•	•	•	•	•	•	•	•	•
		LTC	•	•	•	•	•	•	•	•	•
MBrace® AK 60	Standard	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	LTC	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
MBrace® EG 900	Standard	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
	LTC	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
LAMINADO	MBrace® 100/1.4	No se requiere	•	•	•	•	•	•	•	•	
	MBrace® 50/1.4	No se requiere	•	•	•	•	•	•	•	•	
	MBrace® 10/1.4	No se requiere	•	•	•	•	•	•	•	•	

**MBrace® Topcoat**  
Guía de Selección

	COLOR DEL CONCRETO	TEXTURA DEL CONCRETO	PROTECCIÓN UV	USO EXTERIOR	ALTA RESISTENCIA QUÍMICA	RETARDO AL FUEGO
MBrace® Topcoat ATX	•	•	•	•	•	•
MBrace® Topcoat FRL	•	•	•	•	•	•
MBrace® Topcoat	•	•	•	•	•	•

Fuente: (MasterBrace, 2008)

## Anexo 21 Especificaciones técnicas "deformaciones" fibra de carbono de MBrace

**Tabla 5 Especificaciones técnicas "Deformaciones" fibra de carbono**

MBrace® Deformación Refuerzo De Fibra	ARQUITECTURA DE LA LÁMINA	ESPESOR NORMAL (POR CAPA)	RESISTENCIA DE DISEÑO	MODULO DE TENSION	DEFORMACION A ROTURA
CF 130 Lámina de fibra de carbono	300 g/m <sup>2</sup> (9 onzas) Unidireccional	0,165 mm/capa (0,0065 pulg./capa)	3800 MPa (550 ksi)	227 GPa (33,000 ksi) de alta resistencia	1,67%
CF 160	600 g/m <sup>2</sup> (18 onzas) Unidireccional	0,330 mm/capa (0,0130 pulg./capa)	3800 MPa (550 ksi)	227 GPa (33,000 ksi) de alta resistencia	1,67%
CF 530 Lámina de fibra de carbono	300 g/m <sup>2</sup> (9 onzas) Unidireccional	0,165 mm/capa (0,0065 pulg./capa)	3500 MPa (510 ksi)	373 GPa (54 000 ksi) de alto módulo	0,94%
AK 60 Lámina de fibra de aramida	600 g/m <sup>2</sup> (18 onzas) Unidireccional	0,279 mm/capa (0,0110 pulg./capa)	2000 MPa (290 ksi)	120 GPa (17 400 ksi)	1,67%
EG 900 Lámina de fibra de vidrio "E"	900 g/m <sup>2</sup> (27 onzas) Unidireccional	0,353 mm/capa (0,0139 pulg./capa)	1520 MPa (220 ksi)	72,4 GPa (10 500 ksi)	2,10%

Fuente: (MasterBrace, 2008)

## Anexo 22 Especificaciones técnicas "Barras y Laminados" fibra de carbono

**Tabla 6 Especificaciones técnicas "Barras y Laminados" fibra de carbono**

MBrace® Barras Y Laminados	ARQUITECTURA DEL PRODUCTO	ANCHO DIAM.	ESPESOR NOMINAL	TENSION ULTIMA	MODULO ELASTICO	DEFORMACION ROTURA
10/1.4	Prefabricado Carbón/Epoxi	10mm (3/8")	1.4 mm 0.055"	2690 MPa 390 ksi	160 GPa 23,000 ksi	1.67%
50/1.4	Prefabricado Carbón/Epoxi	50mm (2")	1.4 mm 0.055"	2690 MPa 390 ksi	160 GPa 23,000 ksi	1.67%
100/1.4	Prefabricado Carbón/Epoxi	100mm (4")	1.4 mm 0.055"	2690 MPa 390 ksi	160 GPa 23,000 ksi	1.67%

Fuente: (MasterBrace, 2008)

## Anexo 23 Ventajas uso de platina metálica y CFRP

Tabla 7 Ventajas platina metálica y platina CFRP

	Platina metálica	Platina CFRP
<b>Peso propio</b>	Alto	Bajo
<b>Resistencia a la tensión</b>	Alta	Muy alta
<b>Espesor general</b>	Bajo	Muy bajo
<b>Corrosión</b>	Sí	Ninguna
<b>Longitud de las platinas</b>	Limitada	Cualquiera
<b>Manejo</b>	Difícil, rígido	Flexible, fácil
<b>Capacidad de carga</b>	En cualquier dirección	En dirección longitudinal
<b>Cruces</b>	Complejo	Fácil
<b>Comportamiento a la fatiga</b>	Adecuado	Sobresaliente
<b>Costo de materiales</b>	Bajo	Alto
<b>Costo de instalación</b>	Alto	Bajo

Fuente: (Fernandez Flores, 2012)

## Anexo 24 Adhesivos epóxico entre concreto y elementos metálicos



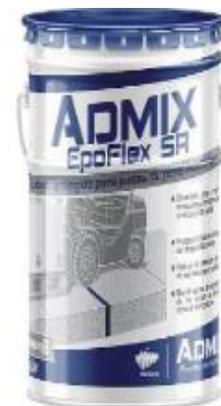
Admix Epofix

Adhesivo y anclaje estructural base epóxica ideal para anclajes y reparaciones



Admix Epoflex LV

Epóxico estructural de baja viscosidad para reparación de grietas en concreto



Admix Epoflex SR

Sellador epóxico semi rígido, diseñado especialmente para sellar juntas en pisos industriales

Ilustración 65 Epóxico de ADMIX

Fuente: (Lazarus&Lazarus, 2021)

## Anexo 25 Anexos Datos técnicos adhesivos

Tabla 8 Datos técnicos adhesivos

Propiedades*	Dato	Método
Temperatura de Almacenamiento	10 -32 °C (50 -90 °F)	Interno
Proporciones de Mezcla (A: B)	2: 1 por volumen	N/A
Tiempo de Gel (60 gramos)	27 min	ASTM C881
Viscosidad	500Cp	ASTM C881
Tiempo abierto (1 gal)	19 min.	
Resistencia a la Compresión Módulo de compresión	10,150 psi(714 kg/cm <sup>2</sup> ) 300,000 (2,068 MPa)	ASTM D695, 7 días
Resistencia a la tensión Elongación en tensión	7,230 psi (498 kg/cm <sup>2</sup> ) 4.4 %	ASTM D638, 7 días
Adherencia en Plano Inclinado Endurecido a endurecido Endurecido a endurecido Fresco a endurecido	1,580 (109 kg/cm <sup>2</sup> ) 2,950 (203 kg/cm <sup>2</sup> ) 1,720 (119 kg/cm <sup>2</sup> )	ASTM C882 2 días 14 días 14 días
Temperatura de deflexión térmica	120° F (48.9° C)	ASTM D648, 7días
Absorción de agua	0.3%	ASTM D570, 14 días
Coefficiente lineal de encogimiento	0.0003%	ASTM D2566, 48 hrs

Fuente: (Lazarus&Lazarus, 2021)

## Anexo 26 Entrevistas para investigar el uso de polímeros en Honduras

Como parte de la investigación se llevaron a cabo entrevistas a expertos en materia del uso de polímeros para estructuras de concreto, las cuales se detallan a continuación:

### 9.1 ENTREVISTA ING. ROBERTO LAGOS, LAZARUS & LAZARUS TONCONTÍN

Lagos (2023) encargado de ventas en la sucursal de Toncontín, Tegucigalpa afirma que: en Honduras el tema de los polímeros está cada vez más actualizado y ha cobrado importancia en las construcciones en Honduras, especialmente en Tegucigalpa y San Pedro Sula que son las ciudades con mayor densidad poblacional del país. También, como capacitado en la materia, ha comentado que los productos que más se venden en la empresa son las microfibras y macrofibras, que tienen diferente aplicación, ya que las microfibras se usan para ayudar con la resistencia del concreto, mientras que las macrofibras pueden reemplazar el acero de

refuerzo. Agrega que, las micro y macrofibras son diferentes a los laminados de carbono, se utilizan en menor escala, para secciones transversales menores.

En cuanto a las fibras de carbono, Lagos (2023) concluye que a inicios del uso de la tecnología con polímeros la empresa figuraba como proveedora de productos Sika, una de las compañías más grandes de Latinoamérica, pero ahora se cuenta con un proveedor directo de productos Sika en la zona.

## **9.2 ENTREVISTA MSc. ING. LUZ MARINA FUNES, DOCENTE FI UNITEC**

Funes (2023) docente de la Facultad de Ingeniería (FI), UNITEC, afirma que: En Honduras está estancado este tema de reforzar las estructuras de concreto armado por la falta de contratistas que tengan experiencia y conocimiento. También agrega que estuvo involucrada en una propuesta que hizo a una empresa que quería rehabilitar el edificio con fibras de carbono y que se propuso varias opciones como: postensado externo, fibra y al final se fueron por un ensanchamiento del elemento como un encamisado que es una de las técnicas de rehabilitación tradicional.

Funes (2023) dice que la razón por la que no quisieron la fibra fue por temas de nivelación de la viga, ya que la nivelación de la superficie tiene que ser casi perfecta para que la fibra quede adherida de una correcta manera y no sufra de malas prácticas y que la empresa no escogió esta técnica porque no encontraron un contratista que les asegurara que iba quedar bien adherida.

En cuanto a las normas y regulaciones en Honduras, Funes (2023) concluye que el CHOC se guía y respalda de las normativas del ACI-440.3R-04 para la utilización de esta tecnología en el ámbito de la construcción en el país.

### **9.3 ENTREVISTA ING. LUIS FRANCISCO PERNA, LAZARUS & LAZARUS SUYAPA**

Perna (2023) encargado de ventas en la sucursal de Suyapa, Tegucigalpa afirma que: en Honduras la venta de las fibras de carbono para reforzar las estructuras de concreto armado son poco usuales y que ellos como empresa solamente fabrican a medida exacta la fibra de carbono en tejidos o laminas como el cliente lo desee. También, Perna (2023) agrega que el como ingeniero constructor recomienda el uso de los micro y macrofibras en todas las construcciones que no requieran esfuerzos tan grandes ya que estos polímeros ayudan con las grietas y fallos de los elementos de concreto. También, como capacitado en la materia, ha comentado que Honduras necesita implementar cursos obligatorios para los contratistas ya que reforzar las estructuras de concreto reforzado con la fibra de carbono es una solución cada vez más útil en la construcción y que su efectividad y poco espacio que necesita es un factor importante por el cual el mundo está decidiendo reforzar con esta tecnología.

En cuanto a las microfibras, Perna (2023) concluye que una bolsa de esta microfibra por metro cubico es lo recomendable para fundiciones comunes, mientras que las macrofibras son más caras y tienen que cumplir normas de estándar que ellos las hacen cumplir en la fábrica que justamente está ubicada en San Pedro Sula.