



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Civil**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE  
CONCRETO ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA  
CON BARRAS DE FIBRA DE CARBONO**

**Luis Rodolfo Rosales Guzmán**

**Asesorado por el Ing. José Gabriel Ordóñez Morales**

**Guatemala, abril de 2008**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE CONCRETO  
ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA CON BARRAS DE FIBRA  
DE CARBONO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**LUIS RODOLFO ROSALES GUZMÁN**

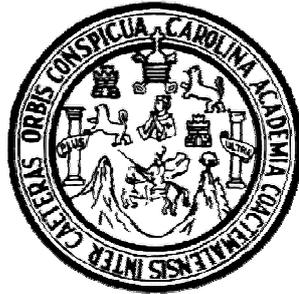
ASESORADO POR EL ING. JOSE GABRIEL ORDÓÑEZ MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, ABRIL DE 2008

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, someto a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE  
CONCRETO ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA  
CON BARRAS DE FIBRA DE CARBONO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, el cinco de septiembre de 2006.

---

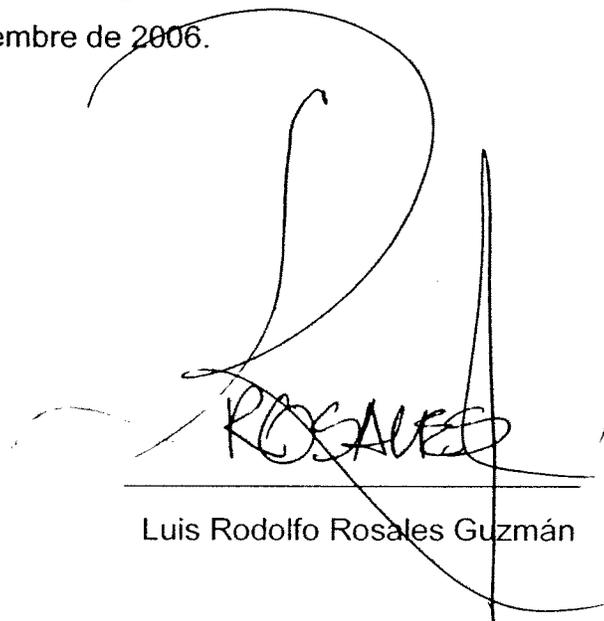
Luis Rodolfo Rosales Guzmán

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, someto a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE  
CONCRETO ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA  
CON BARRAS DE FIBRA DE CARBONO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, el cinco de septiembre de 2006.



**ROSALES**

---

Luis Rodolfo Rosales Guzmán

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala 25 de febrero de 2008

Ingeniero Civil  
Francisco Javier Quiñónez de la Cruz  
Coordinador de Área de Materiales y Construcciones Civiles  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE CONCRETO ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA CON BARRAS DE FIBRA DE CARBONO**, que desarrolló el estudiante universitario **Luis Rodolfo Rosales Guzmán**, con número de **Carné 9514749**, el cual cumple con los objetivos propuestos.

Atentamente,



Ing. José Gabriel Ordóñez Morales  
Asesor

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 11 de marzo de 2008

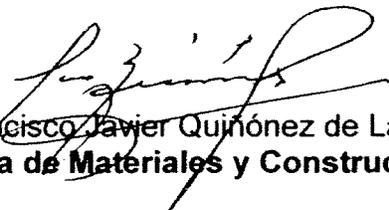
Ingeniero  
Fernando Amílcar Boiton Velásquez  
Director de Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Por este medio me dirijo a su persona, para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE CONCRETO ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA CON BARRAS DE FIBRA DE CARBONO**, que desarrolló el estudiante universitario: **Luis Rodolfo Rosales Guzmán**, con carné No. **9514749**, quién fue asesorado por el Ingeniero José Gabriel Ordóñez Morales.

Considero que el trabajo realizado cumple con los objetivos planteados, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,  
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Francisco Javier Quijón de La Cruz  
Coordinador Área de Materiales y Construcciones Civiles





El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. José Gabriel Ordóñez Morales y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz, al trabajo de graduación del estudiante Luis Rodolfo Rosales Guzmán, titulado ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE CONCRETO ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA CON BARRAS DE FIBRA DE CARBONO, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Fernando Amilcar Boiton Velásquez



Guatemala, abril 2008.

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE CONCRETO ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA CON BARRAS DE FIBRA DE CARBONO**, presentado por el estudiante universitario **Luis Rodolfo Rosales Guzmán**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. ~~Murphy Olympo Paiz Recinos~~  
DECANO



Guatemala, abril de 2008

/cc

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	V
<b>GLOSARIO</b>	VII
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	XI
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	XIII
<b>RESUMEN</b>	XV
<b>OBJETIVOS</b>	XVII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XIX
<b>1. BARRAS DE FIBRA DE CARBONO</b>	
1.1 Historia	1
1.2 Definiciones	2
1.3 Ensayos y control de calidad del sistema de refuerzo	12
1.3.1 Caracterización de fibras	12
1.3.2 Caracterización de la resina epóxica	13
1.3.3 Caracterización de las barras	14
1.3.3.1 Densidad	14
1.3.3.2 Porcentaje de volumen en fibra	15
1.3.3.2.1 Método de la disolución en ácido	15
1.3.3.2.2 Método directo	16
1.3.3.3 Determinación de las propiedades mecánicas de tracción	16
1.3.3.3.1. Probeta de ensayo	17
1.3.3.3.2 Lengüetas de amarre	18
1.3.3.3.3 Procedimiento de ensayo	19

1.4 Propiedades	20
1.4.1 Físicas	20
1.4.2 Mecánicas	20
1.4.3 Químicas	21
1.5 Componentes del sistema de refuerzo con barras de fibra de carbono	23
<b>2. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO</b>	
2.1 Preparación previa a aplicación del sistema de refuerzo	25
2.1.1 Evaluación de las características y propiedades requeridas por el sistema de refuerzo	25
2.1.2 Limpieza de la superficie de concreto	27
2.1.3 Espacio para colocación de barras	28
2.2 Secuencia de aplicación de los componentes del sistema de refuerzo	29
2.2.1 Imprimación epóxica	29
2.2.2 Colocación de barras	30
2.2.3 Recubrimiento epóxico final	31
<b>3. METODOLOGÍA</b>	
3.1 Investigación bibliográfica	33
3.2 Diseño del experimento	33
<b>4. ELABORACIÓN DE VIGAS MUESTRA</b>	
4.1 Características de vigas de concreto armado	35
4.2 Características de vigas de concreto armado, reforzado con fibra de carbono	35
4.3 Materiales utilizados	35
4.4 Equipo utilizado	36

4.5 Dimensiones de las vigas	36
4.6 Diseño teórico estructural de las vigas	37
4.7 Diseño de refuerzo con barras de fibra de carbono	39
<b>5. ENSAYOS DE LABORATORIO</b>	
5.1 Métodos de ensayo	41
5.2 Estimación de cargas de ensayo	42
5.3 Procedimiento de ensayo	43
<b>6. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
6.1 Tabulación de resultados	45
6.2 Gráficas comparativas	48
6.3 Fallas por flexión	52
6.4 Discusión de los resultados	54
<b>7. EXPERIENCIAS</b>	
7.1 Experiencias en Guatemala	57
7.2 Experiencias en otros países.	61
<b>CONCLUSIONES</b>	65
<b>RECOMENDACIONES</b>	67
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	69

.

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Fibra de carbono y matriz polimérica	2
2. Ampliación microscópica de PRF	6
3. Ensayo a filamentos de fibra de carbono	12
4. Ensayo de tracción para resinas epóxicas	13
5. Probeta de ensayo a tracción	18
6. Barras de fibra de carbono	23
7. Resina epóxica	24
8. Rehabilitación del concreto	26
9. Inyección epóxica	27
10. Limpieza y preparación de superficie	28
11. Espacio para colocación de barras	29
12. Imprimación epóxica	30
13. Colocación de barra	31
14. Recubrimiento epóxico final	32
15. Elaboración de vigas de concreto armado	38
16. Curado de vigas de concreto armado	38
17. Software para cálculo de área de refuerzo	39
18. Software para cálculo de área de refuerzo	39
19. Diagrama para colocación de barras de fibra de carbono	40
20. Ensayo de flexión en viga de concreto armado	42
21. Diagrama de procedimiento de ensayo	43
22. Gráfica carga – deflexión	44
23. Gráfica de comparación por módulo de ruptura	48
24. Gráfica de comparación por carga máxima permisible	49
25. Gráfica de comparación por deflexión máxima	50
26. Gráfica de comparación por deflexión de rotura	51
27. Ensayo en viga sin refuerzo de fibra de carbono	52
28. Ensayo en viga con refuerzo de fibra de carbono	52

29. Ensayo en viga sin refuerzo de fibra de carbono	53
30. Ensayo en viga con refuerzo de fibra de carbono	53
31. Refuerzo en edificio Planta Cementera	57
32. Refuerzo en edificio centro comercial, en plenas operaciones comerciales	58
33. Refuerzo en edificio centro comercial, en plenas operaciones comerciales	58
34. Refuerzo en columnas circulares Aeropuerto Internacional La Aurora	59
35. Refuerzo en columnas circulares Aeropuerto Internacional La Aurora	59
36. Refuerzo en edificio zona 14 capitalina	60
37. Refuerzo en edificio zona 14 capitalina	60
38. Refuerzo a flexión con barras de fibra de carbono en losas deflectadas	61
39. Refuerzo a flexión con barras de fibra de carbono en losas deflectadas	61
40. Refuerzo en puente de planta cementera	62
41. Refuerzo en puente de planta cementera	62
42. Refuerzo en silos de planta cementera	63

## **TABLAS**

I. Dimensiones recomendadas de la probeta (en mm)	18
II. Vigas sin refuerzo de fibra de carbono	46
III. Vigas con refuerzo de fibra de carbono	46
IV. Comparación por módulo de ruptura	47
V. Comparación por carga máxima	47

## GLOSARIO

<b>Anisotropía:</b>	Característica de la fibra de carbono de tener diferentes propiedades mecánicas dependiendo del sentido de aplicación de la carga, comportandose de manera distinta.
<b>Barras de fibra de carbono:</b>	Barra de sección rectangular fabricada de fibra de carbono de grado aeroespacial y matriz polimérica, para refuerzo de estructuras de concreto y mampostería.
<b>Concreto reforzado:</b>	Es el concreto que además del refuerzo por contracción y cambios de temperatura, contiene otro refuerzo, dispuesto de tal manera que los dos materiales actúan juntos para resistir las fuerzas exteriores.
<b>Ensayo a flexión:</b>	Sirve para determinar la máxima carga a soportar por una viga cuando está sometida a una fuerza que le produce pandeo.
<b>Falla en concreto:</b>	Punto arbitrario, donde el concreto deja de ser funcionalmente apto para su uso destinado. Defecto material del concreto, que merma su resistencia al momento de aplicarle una o varias fuerzas o cargas.



**Fatiga:**

Pérdida de resistencia por carga aplicada constantemente. Es el cambio permanente estructuralmente progresivo, que ocurre en un material sometido a esfuerzos o cargas constantes, que en un determinado punto o puntos, puede ocasionarle grietas, deformaciones o incluso fracturas, después de un número repetido de fluctuaciones.

**Fibra de carbono:**

Material con base en carbono, bajo la forma de fibras en la cual los átomos de carbono se quedan en perfecta alineación, esta alineación es la que produce la elevada resistencia de la fibra de carbono.

**Fibras:**

Uno o más filamentos en un orden de ensamblaje. Elementos sustentadores de la carga en un material compuesto que exhibe una microestructura bien orientada y libre de defectos, con un diámetro menor a un milímetro.

**FRP:**

(Fiber Reinforced Polymers) Por sus siglas en inglés, polímeros reforzados con fibra.

**Imprimación:**

Es la primera capa de resina epóxica, utilizada para rellenar la estructura porosa

del concreto y facilitar una adherencia adecuada al substrato de concreto.

**Inyección epóxica:**

Es el proceso de adhesión al concreto, mediante una resina epóxica de muy baja viscosidad, la cual es introducida a presión o por gravedad, para unir ambas partes de concreto endurecido.

**Matriz Polimérica:**

Elemento macromolecular, que recubre y protege las fibras de carbono para mantenerlas juntas y perfectamente alineadas.

**PAN:**

Poli Acrilo Nitrilo, material compuesto proveniente de la industria de refinado de petróleo.

**Polímero:**

Material macromolecular formado por la combinación química de monómeros, que tienen la misma o diferente composición química.

**Refuerzo estructural:**

Aumento de la capacidad estructural de un elemento que está en buenas condiciones, a fin de adaptarlo a un cambio de la carga.

**Resina epóxica:**

Líquido viscoso o pasta rígida multicomponente, que a través de una reacción química provee una alta

adherencia, resistencia a compresión y a tensión. Matriz del material compuesto termoestable cuya función es la de mantener fijas las fibras, permitir la transferencia de carga entre las mismas y protegerlas del ambiente.

**Sistema de refuerzo:**

Es la unión de una barra de fibra de carbono y una resina epóxica, adherida al concreto para incrementar su resistencia.

## JUSTIFICACIÓN

Actualmente Europa y Estados Unidos hacen uso frecuente del refuerzo estructural en vigas con barras de fibra de carbono, no así en Guatemala donde se conoce y utiliza muy poco esta alternativa debido a que se tiene la creencia que es muy caro o complicado. Por lo tanto, se siguen utilizando métodos tradicionales por temor al fracaso y al cambio, ya que del refuerzo estructural depende la estabilidad de la estructura.

Por esta razón, surge la motivación de hacer un estudio documentado y un análisis a través del ensayo a flexión que sirva de guía a quien lo consulte y le proporcione orientación acerca de lo que se puede lograr con este material, el procedimiento para colocarlo, los materiales accesibles en el medio, con los que se puede trabajar, así como una forma sencilla de calcularlo y cuantificarlo, para obtener un método de construcción nuevo y diferente a los métodos tradicionales.

El estudio de este sistema de refuerzo con barras de fibra de carbono busca dar a conocer en el país el uso de este método con sus aplicaciones, ventajas, características, materiales, propiedades y comportamientos. Asimismo se busca comparar las resistencias a flexión por medio del uso del refuerzo con barras de fibra de carbono versus una viga sin ningún tipo de refuerzo; para obtener a través del análisis del ensayo, números comparativos que reflejen las ventajas de la utilización de esta técnica y el comportamiento de una viga, a lo largo de la prueba.

Una razón más para la realización de esta investigación es el trasfondo cultural guatemalteco, ya que el país cuenta con muchos edificios ricos en historia arquitectónica, que con el uso de este tipo de refuerzo se lograría rescatar cualquier viga o elemento que exija alta resistencia a la flexión sin modificar su geometría, forma, o apariencia visual, conservando así las características originales de los elementos estructurales. Al mismo tiempo, el uso de este sistema de refuerzo añade resistencia y vida útil al elemento sin que sufra daños la viga o la estructura integral.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la creciente necesidad de reparar o rehabilitar vigas de concreto armado surge la tecnología de refuerzo con barras de fibra de carbono. Sin embargo, el poco uso en Guatemala de estos métodos hace que se realicen reparaciones costosas, complicadas y que en ocasiones cambian las características y aspecto de las vigas a reforzar. En peores casos, por el desconocimiento de técnicas fáciles y rápidas, incluso se llega a extremos como demoler o simplemente no se hace ningún tipo de refuerzo, aunque la estructura lo amerite. Para esto se requiere estudiar los ensayos necesarios que determinarán el comportamiento y aplicación de las diferentes técnicas que se pueden aplicar, según las necesidades del entorno guatemalteco.

Muchas de las tareas que se realizan con el refuerzo de vigas incluyen el uso de diversos equipos y maquinaria, por lo que dejan de ser rentables o prácticas cuando se encuentran condiciones adversas a las aplicaciones de las mismas.

Este refuerzo dará solución a problemas tales como:

- a) Incremento de cargas vivas a estructuras.
- b) Refuerzos que requieren poco tiempo y espacio.
- c) Control y resane de fisuras.
- d) Envejecimiento de los materiales.
- e) Corrosión del acero de refuerzo.
- f) Daño a partes estructurales.
- g) Dimensiones insuficientes.
- h) Área de acero insuficiente.

Ante la necesidad de añadir a las vigas de una estructura mayor resistencia a flexión, tensión y elevación del módulo de elasticidad con elementos livianos pero resistentes, fáciles de maniobrar pero eficientes; se busca analizar el ensayo a flexión para que a través de los resultados que se obtendrán en el laboratorio, se puedan determinar diferencias que reflejen el uso y beneficios estructurales obtenidos con la aplicación de barras de fibra de carbono.

## RESUMEN

Las barras de fibra de carbono son un elemento de refuerzo estructural, para vigas y para muros de carga, en ambos casos el impacto estético es muy bajo, y el procedimiento de aplicación es muy sencillo; por lo que es una alternativa muy eficiente para elementos estructurales en funcionamiento.

En este trabajo se elaboraron vigas de concreto armado, de las cuales la mitad se reforzó con barras de fibra de carbono, para demostrar los incrementos significativos en cuanto a módulo de ruptura y carga máxima permisible; basados en un ensayo de flexión, con una carga puntual aplicada y la viga simplemente apoyada en sus extremos.

Se describe el proceso de aplicación de la fibra de carbono, demostrando su facilidad de aplicación y los requerimientos mínimos de preparación de un elemento de concreto para hacer funcionar el refuerzo.

Según lo investigado, el refuerzo de barras de fibra de carbono ofrece una solución efectiva a problemas comunes; que van desde: incremento de cargas a una estructura, fatiga y envejecimiento del concreto y acero, hasta malos diseños estructurales.

Se exponen a su vez experiencias nacionales e internacionales, en las cuales el refuerzo estructural con fibra de carbono, ha sido la solución a diferentes circunstancias, tanto en el campo de la construcción como en diversas industrias. Ejemplificando casos reales detallando el problema y la solución encontrada en la fibra de carbono.

Aunque esta investigación se limita a un refuerzo estructural a flexión, en vigas de concreto, existen productos de fibra de carbono, que pueden utilizarse en refuerzos de columnas a compresión y confinamiento, refuerzos en zonas de corte en vigas y nudos de estructuras, así como muros de carga y pisos o pavimentos que requieran altas resistencias a la abrasión.

## **OBJETIVOS**

### **General:**

Demostrar la diferencia entre usar o no un refuerzo con barras de fibra de carbono en un ensayo a flexión sobre una viga de concreto armado.

### **Específicos:**

1. Dar a conocer las ventajas de los ensayos a flexión, las cuales se deducirán según las aplicaciones que se realizarán a las vigas usadas como muestra.
2. Recolectar y documentar experiencias de otros proyectos en los que se han aplicado satisfactoriamente refuerzos con fibra de carbono.
3. Definir las características de los materiales que conforman el sistema de barras de fibra de carbono.
4. Proponer la presente investigación como una guía, para la utilización y colocación adecuada de barras de fibra de carbono en vigas con necesidad de ser reforzadas. En dicha guía se incluye una lista de los pasos a seguir en el proceso constructivo, recomendaciones y prácticas adecuadas para la utilización de las barras.



## INTRODUCCIÓN

Una viga de concreto armado está compuesta por dos elementos indispensables, concreto y acero de refuerzo; en donde el concreto proporciona la resistencia a compresión y el acero la resistencia a tensión y / o flexión. Debido a variedad de circunstancias como fatiga, envejecimiento de materiales y principalmente corrosión o daño en acero, es necesario reparar o rehabilitar las vigas de concreto armado. Una de las mejores alternativas, por su alta tecnología y excelente desempeño, es el sistema de barras de fibra de carbono.

En este trabajo de investigación se recopila una breve historia de la fibra de carbono, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como el proceso de colocación del sistema de refuerzo y los campos de acción de las barras en vigas de concreto armado.

Como parte del desarrollo experimental, se elaboraron cinco vigas de concreto armado con un refuerzo de acero, con estribos; así como cinco vigas de concreto con el mismo refuerzo de acero adicionando una barra de fibra de carbono. Se comparó por medio de un ensayo a flexión y se analizó el comportamiento de ambos grupos de vigas, las diferencias de reacción a los esfuerzos por las cargas aplicadas, así como las diferencias de las fallas entre los dos grupos de vigas.

Adicionalmente al comportamiento de las vigas, se analizó el incremento de resistencia a flexión proporcionado por las barras de fibra de carbono, el impacto estético dentro de las mismas y los beneficios estructurales que puede ofrecer a una viga de concreto armado.



# 1. BARRAS DE FIBRA DE CARBONO

## 1.1 Historia

El refuerzo de fibras es una práctica muy antigua, prueba de ello es que desde aproximadamente el año 3,000 A.C., los egipcios de la antigüedad utilizaron paja para reforzar ladrillos prensados en seco, siendo los primeros compuestos artificiales conocidos.

A principios del siglo XX se inicia el desarrollo de los polímeros sintéticos, y no es sino hasta la década del treinta que se producen los primeros productos fabricados con polímeros reforzados con fibra de vidrio para cascos de barcos. Luego en los años cuarenta comienza el uso de compuestos de polímeros reforzados con fibras en aplicaciones militares de defensa. En la década del cincuenta se inician las investigaciones de su uso como refuerzo de concreto para la industria de la construcción. En la siguiente década incursiona a su vez, en la tecnología de los artículos deportivos.

En los años setenta, se da la introducción comercial de dichos refuerzos para el concreto, pero no es hasta 1983 que se hacen los primeros trabajos de adhesión de láminas de fibra de carbono en concreto en El Japón. Un año más tarde, los mismos japoneses desarrollan el concepto de adhesión de láminas de fibra de carbono colocadas en obra, y al siguiente año se instalan los primeros sistemas de reforzamiento de fibra de carbono en puentes japoneses.

En el año 1991, los suizos incursionan en este tipo de tecnología, reforzando a flexión las vigas del puente Ibach en Lucerna, Suiza. A partir de la década de los noventa, la fibra de carbono incursiona con más fuerza en los sistemas

constructivos de los países desarrollados, abriéndose espacio como una tecnología de punta en el refuerzo de estructuras de concreto armado.<sup>1</sup>

## 1.2 Definiciones

**Fibra de carbono:** La fibra de carbono es un producto proveniente de materiales con base en el poliacrilonitrilo, que tiene origen en la industria de refinado de petróleo, oxidado entre 1500 y 2000 °C. El resultado es un material con base en carbono, bajo la forma de fibras en la cual los átomos de carbono se quedan en perfecta alineación, esta alineación es la que produce la elevada resistencia de la fibra de carbono.<sup>2</sup>

Las fibras producidas mediante tratamiento térmico de un compuesto de la cadena de carbono, el poliacrilonitrilo (PAN, Poli Acrilo Nitrilo), se alinea de modo natural en determinada dirección, y el grado de alineación obtenido por este método químico, es mayor del que se puede obtener por tracción.<sup>3</sup>

**Figura 1. Fibra de carbono y matriz polimérica**



<sup>1</sup> Revista Sistemas de Preservación Estructural, Publicaciones Master Builders, Maryland USA, 2001; p. 2-3.

<sup>2</sup> Ari de Paula Machado, Consultor de refuerzos con fibras de carbono.

<sup>3</sup> Manual Guía Compuesta de Diseño Estructural; 2ª Edición; Publicaciones Master Builders, Ohio USA, 1998; p. 4.

Sin embargo, el paso crucial sobre el que se basa ahora la mayor parte de la producción de fibra de carbono, es combinar la tendencia del PAN a alinearse naturalmente con la tracción mecánica aplicada, durante una fase intermedia su proceso de producción.

Los tejidos a base de fibra de carbono o vidrio son materiales en los que no se ha colocado todavía la matriz de resina. Suelen tener entre el 95 y el 98% de las fibras en dirección longitudinal y entre el 2% y el 5% en la dirección transversal, para efectuar el cosido e impedir el deshilachado de los longitudinales.

Los tejidos tienen un espesor de entre 0,13 y 0,30 mm, con gramaje de entre 200 y 800 g/m<sup>2</sup>. Usualmente presentan anchos entre 30 y 60 cm, en rollos de 40 y 100 m, que posteriormente se cortan en obra a las dimensiones deseadas. Para adherir los tejidos al soporte de hormigón se utilizan resinas epóxicas fluidas. Esa fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas, mojarlas y formar el material compuesto.

En los últimos años el tema de los compuestos de fibras se ha ampliado de tal manera, que las fibras de carbono constituyen ahora sólo una, de una serie de fibras de refuerzo con que se cuenta para uso en materiales compuestos.

También se ha investigado una amplia gama de materiales matriciales, con inclusión del vidrio, las cerámicas y varios polímeros. Se han elaborado incluso compuestos de matriz metálicas en aluminio, magnesio, estaño y plomo.

Una propiedad especial de los compuestos de fibras, es que son anisótropos: su fortaleza difiere de conformidad con la dirección en que se aplica una fuerza

respecto de la dirección de las fibras. Por ejemplo, si se tira del material en paralelo a la dirección de las fibras tendrá una inmensa fortaleza; pero si se aplican fuerzas a 90° de la alineación de la fibra, la resistencia del compuesto depende casi exclusivamente de la matriz de resina relativamente endeble.

Además de poseer propiedades diferentes en las direcciones longitudinal y transversal, los compuestos exhiben diferentes propiedades de tracción y de compresión. En realidad, teniendo tantas propiedades que considerar, los materiales de fibras se convierten en algo extremadamente sofisticado para trabajar con ellos.

Con la ayuda de un ordenador, el proyectista puede seleccionar individualmente la fibra, la matriz, el contenido de la fibra y la orientación del laminado que proporcionarán la rigidez o la fortaleza necesarias, en la dirección y la ubicación deseadas. También pueden usarse ordenadores para controlar los sumamente intrincados modelos en que están colocadas las fibras, con miras a ofrecer la combinación óptima de propiedades mecánicas.

Los compuestos de plástico reforzado tienen una resistencia análoga a la del metal, si se comparan volumen por volumen. Sin embargo, los materiales son menos densos que los metales y por ello ofrecen importantes economías de peso. Los plásticos reforzados también se moldean fácilmente en formas de gran tamaño y son aerodinámicamente eficientes, lo que reduce el número de piezas individuales que se necesitan para las estructuras metálicas.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Manual Guía Compuesta de Diseño Estructural; obra citada; p. 4.

**Resina epóxica:** Parte fundamental de estos sistemas de refuerzo lo constituyen las resinas que garantizan la adhesión de estos refuerzos al soporte. Estas resinas cumplen principalmente las siguientes misiones:

**Imprimación de soportes:** Una de las propiedades de las resinas de base epóxica, destinadas para utilizar en este sistema, es su baja viscosidad; diseñadas para cerrar los poros superficiales del concreto. Una vez preparada la superficie del concreto se procede a aplicar el epóxico como imprimador, que penetrando en el concreto mejora las características resistentes superficiales de éste, a la vez que incrementa la adhesión con la barra de fibra de carbono.

La resina epóxica se presenta en forma de dos componentes (componente activo y endurecedor) envasados por separado que deben mezclarse en el momento de su aplicación. La mezcla de los mismos debe hacerse en la proporción indicada y en la cantidad necesaria para la aplicación que se vaya a realizar, teniendo en cuenta el tiempo de vida en el recipiente (pot-life) y el tiempo abierto de aplicación de la mezcla una vez realizada.

Existen diferentes versiones de resinas epóxicas, en función de la temperatura ambiente, según esté comprendida entre 15° y 35°C (resinas de verano) o entre 5° y 15°C (resinas de invierno).<sup>5</sup>

**Nivelación de la superficie:** Estas resinas epóxicas están especialmente diseñadas para relleno de cavidades, oquedades e irregularidades superficiales menores de 0,5 cm. Posee una elevada adhesión al concreto, buena resistencia a compresión, un tiempo de vida en recipiente (pot-life) y tiempo abierto de utilización adecuados para la aplicación que se va a realizar con ella.

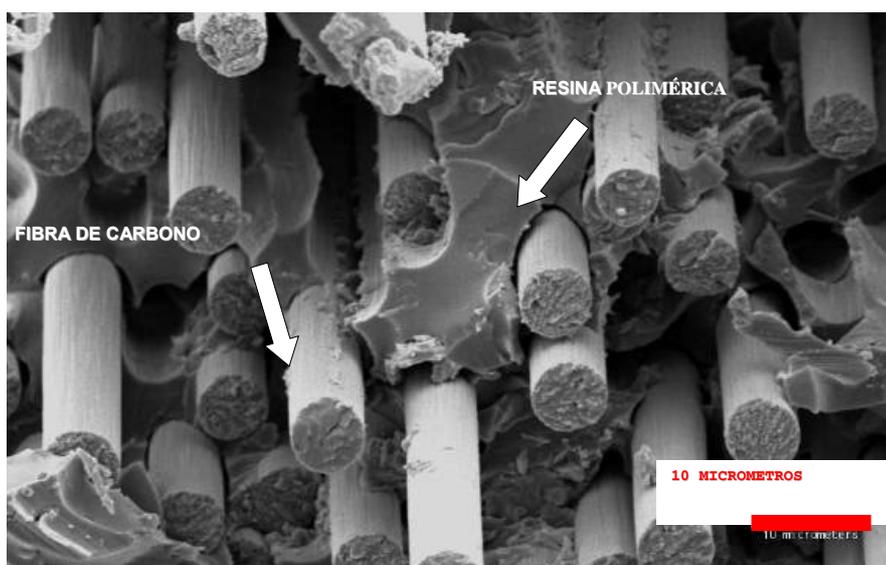
---

<sup>5</sup> Manual Guía Compuesta de Diseño Estructural; obra citada; p. 6.

**Adhesivo de barras:** Actúa a su vez como puente de transmisión de cargas entre las barras de fibra de carbono y el concreto; por consiguiente sus características mecánicas y reológicas son de suma importancia para la mayor eficacia del refuerzo. La misión de la capa de adhesivo o resina es pegar la barra de refuerzo a la superficie del concreto y, al mismo tiempo, crear un compuesto de elevadas características mecánicas capaz de transmitir los esfuerzos desde el concreto a la barra de fibra de carbono. Por consiguiente, tiene que poseer una adhesión al concreto y a la barra muy buena, además de características mecánicas y reológicas adecuadas.

**Sistema de fibra de carbono:** En un sistema compuesto de refuerzo con fibras de carbono, las fibras están recubiertas de una matriz polimérica, y se emplean para aumentar su resistencia, rigidez o ductilidad, en las estructuras de concreto existentes.

**Figura 2. Ampliación microscópica de PRF**



La facultad del átomo de carbono para enlazarse fuertemente consigo mismo, es la base de todos los productos químicos. Pero ahora, incrustando varias fibras basadas en cadenas de carbono en una matriz apropiada, los tecnólogos están creando materiales compuestos que aprovechan la fortaleza del enlace de carbono. Volumen por volumen, estos súper materiales sintéticos son tan fuertes como el metal, pero más livianos y se pueden diseñar por ordenador.

La demostración más dramática de la robustez del enlace carbono-carbono, se ve cuando los átomos de carbono están dispuestos como un cristal de diamante, la más dura de las sustancias conocidas. Pero cuando los átomos de carbono están dispuestos para producir un cristal de grafito, los átomos se hallan en capas, y aunque el cristal no es especialmente resistente a la fuerza en ángulo recto con las capas, es muy fuerte cuando aquélla se ejerce paralelamente a esas capas.

Los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibra (PRF, Polímeros Reforzados con Fibras) se han utilizado durante casi 30 años en aplicaciones aeroespaciales y manufactureras, que requieren pesos livianos y propiedades estructurales de alta resistencia a la tensión y a la corrosión. El rendimiento de los materiales PRF ha sido plenamente comprobado durante años en aplicaciones de ingeniería civil, tales como estructuras de techos, refuerzos internos de concreto, emparrillados y especialmente, como refuerzo de adhesión externa.<sup>6</sup>

La gran eficacia de los materiales PRF en todas las aplicaciones anteriores se debe a sus propiedades de baja fluencia, además de tener menos espesor, ser más ligeros que el acero y exhibir una resistencia a la tensión 10 veces

---

<sup>6</sup> Manual Guía Compuesta de Diseño Estructural; obra citada; p. 3.

superior. Gracias a todas estas características, el sistema compuesto de refuerzo con barras de fibra de carbono, es considerado un sistema de refuerzo de adhesión externa de PRF para estructuras de concreto y mampostería, ya que ha demostrado una calidad indiscutible.

El sistema de barras de fibra de carbono se fabrica en la obra, a partir de sus componentes principales: fibra y polímero.

1. La fibra llega a la obra en forma de barras secas y flexibles, que se conforman a la estructura y se saturan con resina epóxica no curada (componente polimérico).
2. A medida que el epóxico se endurece, se forma un compuesto de PRF rígido que se conforma a la estructura y se adhiere monolíticamente a la misma, mediante la resina de epóxica.

Esta técnica ofrece características de flexibilidad, facilidad de construcción y tiempos de instalación cortos que disminuyen los costos de mano de obra y los tiempos de parada.

El sistema ofrece una alternativa al uso de láminas de acero, aumento de la sección con concreto, o post-tensionamiento externo. El sistema es una solución que brinda una alta relación eficacia – costo, además de facilidad de aplicación, adaptabilidad y rendimiento a largo plazo, lo cual hace posible emprender proyectos de reparación complicados.

**Campo de aplicación:** Los campos de aplicación de los adhesivos descritos anteriormente son los siguientes:

**Refuerzo a flexión:** Para el refuerzo a flexión de vigas, viguetas, forjados y otros elementos de concreto armado se utiliza, principalmente, el método de pegado de laminados rectos. En algún caso también se puede utilizar el método de pegado de los tejidos. En ambos casos consiste en adherir el refuerzo que actuará como armadura externa de tracción. El adhesivo servirá para transmitir el esfuerzo cortante entre el refuerzo y el hormigón.

**Refuerzo por confinamiento:** Para elementos sometidos a compresión simple o compuesta se puede hacer un refuerzo por confinamiento. Este tipo de refuerzo se hace principalmente en pilares. El sistema a utilizar es el de tejidos, debido a su fácil adaptabilidad a cualquier forma del soporte. Con los tejidos se envuelve la pieza a reforzar completamente, de abajo a arriba. Se le pueden poner tantas capas de tejido como se desee. Esta envoltura provoca un confinamiento de la pieza que hace mejorar su comportamiento frente a cargas. Cuando la pieza se comprime, se acorta y por efecto Poisson se dilata transversalmente. El efecto de confinamiento es controlar esta dilatación transversal, mejorando así la capacidad portante.

**Refuerzo a cortante:** Para el refuerzo de piezas a cortante se colocan las fibras de carbono a modo de estribos externos, adheridos por la resina epóxica. Para realizar este tipo de refuerzo se puede utilizar tanto el sistema de tejidos como el de laminados pre - conformados en forma de "L" o en forma de "U". En ambos casos, se trata de envolver o cercar transversalmente el elemento a reforzar.

**Refuerzo de muros:** Otro tipo de refuerzo, quizá menos usual, es el de muros de fábrica de ladrillo como de hormigón. Estos muros pueden estar sometidos tanto a esfuerzos longitudinales (cargas sísmicas, de viento, etc.) como verticales (cargas gravitatorias). Con el sistema de pegado de tejidos, colocado

en forma de cruz de San Andrés, se logra mejorar la capacidad portante de los muros contra cualquiera de las cargas indicadas anteriormente.<sup>7</sup>

**Criterios generales de diseño:** La tecnología de refuerzos estructurales utilizando materiales elaborados con fibra de carbono es relativamente nueva dentro del mundo de la construcción, si hacemos la comparación con otros tipos de materiales utilizados en los refuerzos como el acero, ya sea empleado en forma de platinas empotradas, armaduras colocadas posteriormente o perfiles añadidos.

Dentro del campo de la reparación y refuerzo de estructuras, los técnicos proyectistas se han tenido que enfrentar a problemas estructurales que requieren soluciones no amparadas de manera implícita por ninguna normativa; este es el caso del cálculo de refuerzos con platinas empotradas, adheridas con resina epóxica. Este tipo de refuerzos se viene calculando y realizando desde hace más de 30 años, basándose en los ensayos realizados en diferentes centros de investigación, tesis doctorales y la experiencia acumulada por las realizaciones.

El buen criterio del proyectista de refuerzos juega un papel fundamental a la hora de la toma de decisiones en la elección de los modelos de cálculo que estima más adecuados para la realización del dimensionamiento de los refuerzos.

### **Normativas generales**

1. Código modelo para el hormigón estructural; del Comité Euro-Internacional del Hormigón (CEB) y la Federación Internacional del

---

<sup>7</sup> Revista Sistemas de Preservación Estructural; obra citada; p. 3.

Pretensado (FIP), es una síntesis de los avances científico-técnicos de la década previa a su publicación en seguridad, proyecto y cálculo de estructuras de hormigón.

2. Código de requerimientos de construcción para concreto estructural; del Instituto Americano del Concreto (ACI) 318-05.

### **Normativas particulares**

1. Reporte de refuerzo con fibras plásticas para estructuras de concreto; del Instituto Americano del Concreto (ACI) 440R-02.
2. Recomendaciones para el diseño y construcción de estructuras de concreto utilizando materiales de fibra reforzada continua; de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE).
3. Diseño y construcción de edificios con componentes de fibra reforzada con polímeros; de la Asociación Canadiense de Normas (CSA).
4. Refuerzo para estructuras de concreto; de la Federación Internacional del Pretensado (FIP).

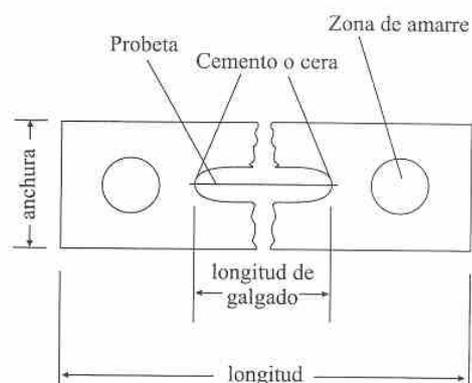
El cálculo y diseño de estructuras con materiales compuestos requiere disponer de datos experimentales fiables. En los casos de cálculo y análisis, la caracterización experimental se puede hacer a varias escalas: micro mecánica, macro mecánica o estructural. El ensayo de los materiales compuestos tiene tres objetivos principales: determinación de las propiedades básicas de la barra unidireccional, para su uso como datos de entrada en el cálculo y diseño estructural; investigación y verificación de modelos mecánicos de comportamiento; y estudios experimentales del comportamiento del material y de estructuras con geometrías específicas y bajo condiciones de carga determinadas. Bajo estos tres objetivos generales, podemos nombrar tipos específicos de ensayos y aplicaciones concretas de dichos ensayos:

## 1.3 Ensayos y control de calidad del sistema de refuerzo

### 1.3.1 Caracterización de fibras

Las propiedades ensayadas más comunes son el módulo longitudinal, la resistencia a tracción y el alargamiento a rotura. La norma ASTM D 3379-89 “Método de prueba para la medición de la resistencia a tensión y módulo de Young, para materiales de filamentos simples de alto módulo”; describe un ensayo apropiado para la caracterización de estos parámetros; a pesar de que dicha norma fue anulada en el año de 1998 sin tener reemplazo, este método se recomienda para fibras con módulo elástico mayor de 21 Gpa. El ensayo se realiza sobre una fibra individual o filamento, que se monta a lo largo del eje central de un papel troquelado que permite tensar y alinear la fibra sin dañarla. Una vez que la probeta se monta en la máquina de ensayo, el papel se rasga para permitir la elongación de la fibra.

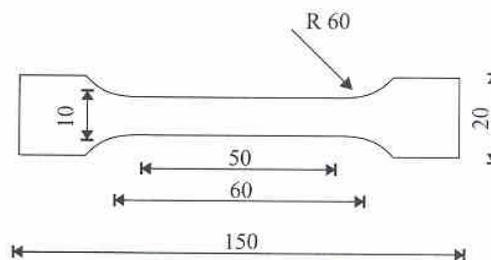
**Figura 3. Ensayo a filamentos de fibra de carbono**



### 1.3.2 Caracterización de la resina epóxica

La resistencia y módulo de tracción, así como la deformación de rotura pueden determinarse usando paneles planos o probetas como la que se muestra en la figura 2. Los detalles de este método de ensayo se reflejan en la Norma ASTM D 638M-03 “Método de prueba para propiedades de tensión de elementos plásticos” para un panel grueso (1,0 a 10,0 mm) y ASTM D 638-03 para un panel delgado (< 1,0 mm).

**Figura 4. Ensayo de tracción para resinas epóxicas**



Debido a la gran dependencia entre la velocidad de deformación y la velocidad de carga, los resultados de los ensayos deben interpretarse cuidadosamente. La deformación puede medirse mediante bandas extensométricas o extensómetros. Si se quiere obtener el coeficiente de Poisson, la deformación transversal puede medirse mediante una banda extensométrica colocada perpendicularmente a la dirección de la carga.

### 1.3.3 Caracterización de las Barras

#### 1.3.3.1 Densidad

La densidad de un material compuesto puede determinarse obteniendo el peso de la probeta en seco y sumergida en agua. La probeta puede ser cualquier pieza de tamaño y forma generales, siempre que su volumen no sea inferior a un  $\text{cm}^3$ . El peso de la probeta sumergida en agua puede determinarse por medio de un hilo fino que rodee la probeta y se una a uno de los extremos de una balanza. El recipiente no debe tocar ni el hilo ni la probeta y cualquier burbuja adherida al hilo o a la probeta debe eliminarse frotando con otro hilo. Los detalles de este método de ensayo se describen en la norma ASTM D 3800-04 "Método de prueba para medición de la densidad de fibras de alto módulo".

$$\rho = \frac{a}{a + w - b}$$

Donde  $a$  es el peso de la probeta en seco,  $w$  el peso del hilo parcialmente sumergido, y  $b$  el peso del conjunto probeta + hilo sumergidos. La densidad se obtiene multiplicando la gravedad específica por 0,9975.

### 1.3.3.2 Porcentaje de volumen en fibra

#### 1.3.3.2.1 Método de la disolución en ácido

El contenido en fibra de los materiales compuestos de matriz orgánica se suele determinar disolviendo la resina del material compuesto en un medio que no ataque la fibra. Una vez que la resina está completamente disuelta, el residuo (la fibra) se filtra, limpia, seca y pesa. La elección del medio que disuelva la resina depende del tipo de matriz. Para las resinas epoxi, el medio más habitual es el ácido nítrico concentrado. La Norma ASTM D3171-06 “Método de prueba para el contenido constitutivo de materiales compuestos”, describe los detalles de este método de ensayo. El porcentaje en volumen de fibra se obtiene a partir del porcentaje en peso de la fibra y de las densidades de la fibra y del material compuesto.

$$\%V_f = \frac{w_f / \delta_f}{w_c / \delta_c} \times 100$$

Donde  $w_f$  es el peso de la fibra en el material compuesto,  $w_c$  el peso del material compuesto,  $\delta_f$  la densidad de la fibra y  $\delta_c$  la densidad del material compuesto.

Si se conoce la densidad de la matriz,  $\delta_m$ , la fracción de volumen de vacíos  $V_v$  puede calcularse a partir de la relación:

$$V_v = 1 - \frac{[w_f / \delta_f + (w_c - w_f) / \delta_m]}{w_c / \delta_c}$$

### 1.3.3.2 Método directo

El porcentaje en volumen de fibra puede determinarse a partir de las densidades de la fibra, la matriz y el material compuesto, suponiendo que el contenido de vacíos es despreciable. En muchos casos, los materiales compuestos de matriz orgánica se fabrican con un contenido de vacíos menor del 1%. En estos casos se acepta calcular el porcentaje de volumen de fibra mediante la expresión:

$$\%V_f = \frac{\delta_c - \delta_m}{\delta_f - \delta_m} \times 100$$

### 1.3.3.3 Determinación de las propiedades mecánicas de tracción

El ensayo de tracción uniaxial constituye el método fundamental para la determinación de datos tales como la especificación del material, inspección, investigación, desarrollo y cálculo de componentes estructurales. Las principales normas europeas son:

- UNE EN 2561:1996 Material aeroespacial. Plásticos reforzados con fibras de carbono. Estratificados unidireccionales. Ensayo de tracción paralela a la dirección de la fibra.
- UNE EN 2597:1999 Material aeroespacial. Plásticos reforzados con fibras de carbono. Laminados unidireccionales. Ensayo de tracción perpendicular a la dirección de las fibras.

- UNE 53189-2: 1977 Materiales plásticos. Placas de materiales estratificados con resinas termoestables. Determinación de la resistencia a tracción.
- EN 61 (UNE 53280:1979) Plásticos. Plásticos reforzados con fibra de vidrio. Determinación de las propiedades de tracción. La normativa americana para tracción en compuestos fibra-resina está en la Norma ASTM D 3039-07 “Método de prueba para las propiedades de tensión de materiales con matrices poliméricas compuestas”. Existen ciertas diferencias entre este ensayo y la normativa europea. La EN 61 y otras como la UNE EN 2561 presentan diferencias tales como la longitud mínima de la probeta (que debe ser de 250 mm en el caso europeo), la forma de la probeta (la EN 61 admite tres tipos distintos), la longitud de las lengüetas de amarre (un mínimo de 50 mm en el caso europeo y no tienen por qué terminar en bisel), el espesor para plásticos reforzados (que puede variar entre 2 y 10 mm) y el espesor para materiales aeroespaciales (que debe ser de 2 mm).

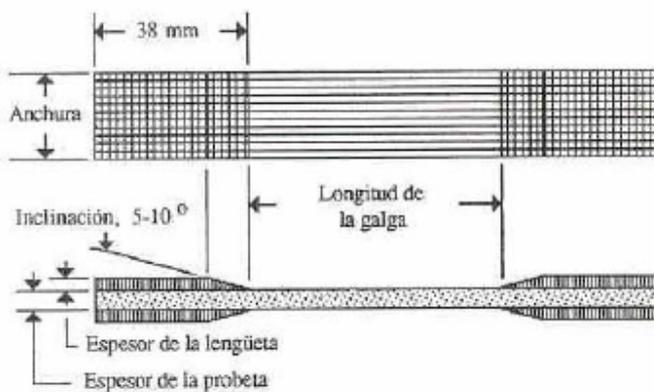
#### **1.3.3.3.1. Probeta de ensayo**

Se aceptan universalmente probetas rectangulares tal como la de las barras, de sección constante, incorporando unas lengüetas en los extremos. La Tabla I representa las dimensiones recomendadas por la norma ASTM D 3039-07, citada en el párrafo anterior. La figura 5 muestra la geometría de la probeta.

**Tabla I. Dimensiones recomendadas de la probeta (en mm)**

Orientación de la fibra respecto a la carga	Anchura (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)
0 grados	12,7	127	1 a 2,54
90 grados	25,4	38	1 a 2,54
Multidireccional	25,4	127	1 a 2,54

**Figura 5. Probeta de ensayo a tracción**



### 1.3.3.2 Lengüetas de amarre

Se utilizan generalmente placas de tejido o laminado cruzado de vidrio, epóxico y aluminio. Las probetas con fibras orientadas a 90 grados se ensayan frecuentemente sin lengüetas de amarre. La longitud de la lengüeta se determina en función de la resistencia a cortadura del adhesivo y la resistencia

a tracción del material compuesto. Debe estar comprendida entre 25 y 38 mm. El espesor de la lengüeta varía con el espesor de la probeta, y su rango de variación se encuentra entre 1,5 y 2,5 mm. Se recomienda utilizar cualquier adhesivo de alta deformación compatible con las condiciones ambientales. Finalmente, se recomienda preparar la superficie de unión mediante las operaciones de lijado y limpieza con un disolvente adecuado.

#### **1.3.3.3.3 Procedimiento de ensayo**

Determinar la anchura y el espesor en varios puntos, y tomar los valores mínimos para el cálculo de la sección de la probeta. Aplicar la carga a través de una serie de mordazas en forma de cuña, con objeto de generar la presión lateral suficiente para evitar el deslizamiento. Se recomienda que la superficie de la mordaza sea estriada. La alineación de los ejes de la probeta respecto a la dirección de la carga es extremadamente importante. Se recomienda una relación de deformación constante desde  $16,7 \times 10^6$  a  $33,7 \times 10^6$ . Se acepta también una velocidad de carga constante o una relación de carga constante correspondiente a la relación de deformación. La medición de deformaciones se llevará a cabo mediante:

- Extensómetro de longitud de galga de 12,5 ó 25 mm
- Resistencia eléctrica de la galga de deformación: 350 ó 120 Ohm. Galga tipo lámina con longitud de 3,3 a 6,5 mm.

## 1.4 Propiedades del sistema compuesto de refuerzo

### 1.4.1 Propiedades físicas

Peso	0.3 Kg. /m <sup>2</sup>
Densidad	1.82 g. /cm <sup>3</sup>
Espesor de una capa	0.165 mm.

Las barras de fibra de carbono tienen un ancho de 16 mm. y un espesor de 2 mm., el área es de 32 mm<sup>2</sup> y la longitud es en rollos de 76 m, empacados en cajas.

Es de hacer notar que este tipo de refuerzo no se debe utilizar como armadura de compresión. El elemento de refuerzo es muy esbelto, por lo que la posibilidad de pandeo del mismo es muy grande. En ensayos realizados se ha visto que con irregularidades del soporte bastante pequeñas se puede producir este fenómeno de inestabilidad, llegando incluso a arrancar parte del soporte del concreto en la superficie adherida.

### 1.4.2 Propiedades mecánicas

Resistencia a la tensión	2,068 N/mm <sup>2</sup> (300,000 psi)
Módulo elástico	131,000 N/mm <sup>2</sup> (19 X 10 <sup>6</sup> psi)
Deformación máxima	1.7 %

Por otro lado, los elementos de fibra de carbono pueden estar fabricados con diferente clase de material, que tienen como parámetro básico de comparación su diferente módulo de elasticidad, así se diferencia:

- Fibras de bajo módulo de elasticidad, con un módulo en el entorno de 2,3 x 10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup> y un alargamiento en rotura aproximado de un 15%.

- Fibras de alto módulo de elasticidad, con un módulo de elasticidad que va entre 4,4 y 6,4 x 10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup> y un alargamiento en rotura de entre un 4 y un 6%.

### **1.4.3 Propiedades químicas**

A temperatura ambiente, las fibras de carbono sin impregnación de resinas son inertes a humedad, productos químicos presentes en la atmósfera, solventes, bases y ácidos débiles. En presencia de agentes oxidantes y temperaturas superiores a 350° C, pueden degradarse. Sin embargo, están protegidas de ataque químico en presencia de una matriz epóxica.

**Exposición ambiental:** Las propiedades físicas de los polímeros sometidos a condiciones húmedas y cálidas se degradan con el tiempo debido al efecto de la difusión de la humedad.

**Exposición química:** La fibra soporta exposiciones químicas moderadas tales como:

- Inmersión en agua salina, según ASTM D 1141-03 “Práctica para la preparación de un sustituto de agua de mar”.
- Inmersión en álcalis hasta un pH 9,5 a 23° C basados en la norma ASTM C 581-03 “Práctica para determinar la resistencia química de resinas usadas en fibras de vidrio, para refuerzo de estructuras”.

**Incendios:** El estudio de la durabilidad ante incendios puede tratarse satisfactoriamente analizando la inflamabilidad superficial e integridad estructural.

**Inflamabilidad superficial:** Mediante la norma ASTM E 84-07 “Método de prueba para determinar las características de exposición al fuego, en superficies de diversos materiales de construcción”, se clasifican acabados superficiales tales como pinturas y recubrimientos, determinando la difusión de la llama y la generación de humo del material cuando se expone a su punto de inflamación con una fuente de calor controlada.

El objetivo de esta prueba es determinar la rapidez de difusión de llama sobre un área específica y determinar la densidad del humo resultante. La cantidad de humo generado es un factor importante para las autoridades que establecen las normas contra incendios, porque en la mayoría de los casos, las muertes son causadas por la inhalación del humo y no por el colapso de las estructuras.

Pruebas de laboratorio indican que en el sistema con fibra de carbono, la difusión de la llama se restringe debido al comportamiento del substrato de concreto como disipador térmico. Se ha demostrado que el sistema aplicado al concreto sin una capa de acabado tiene una clasificación de resistencia al fuego “Clase III” según la norma ASTM E 84-07.

El sistema de fibra de carbono revestido con la capa protectora de resina epóxica, cumple con los requisitos de la norma ASTM E 84-07 para la “Clase I”.

**Clasificación de resistencia estructural al fuego:** A fin de prevenir un colapso estructural, la filosofía de diseño del sistema de fibra de carbono consiste en tratar la reparación como un refuerzo suplementario. Debido a la contribución adicional a la resistencia de la estructura en general, las nuevas cargas de servicio son menores que la carga límite original de la estructura.

Esta misma situación existe con las chapas de acero adheridas, pero tradicionalmente no se ha tomado en cuenta.

Actualmente no existen normas o criterios de falla aceptados para estructuras reparadas o totalmente fabricadas con materiales FRP. Es necesario establecer las guías y las normas pertinentes, pero mientras tanto deberá aplicarse el concepto de refuerzo suplementario.<sup>8</sup>

### **1.5 Componentes del sistema de refuerzo con barras de fibra de carbono**

El sistema está compuesto por dos elementos:

1. Barras de fibra de carbono
2. Resina epóxica para adherir

**Figura 6. Barras de fibra de carbono**



---

<sup>8</sup> Revista Sistemas de Preservación Estructural; obra citada; p. 12.

**Figura 7. Resina epóxica**



## **2. APLICACIÓN DEL SISTEMA DE REFUERZO**

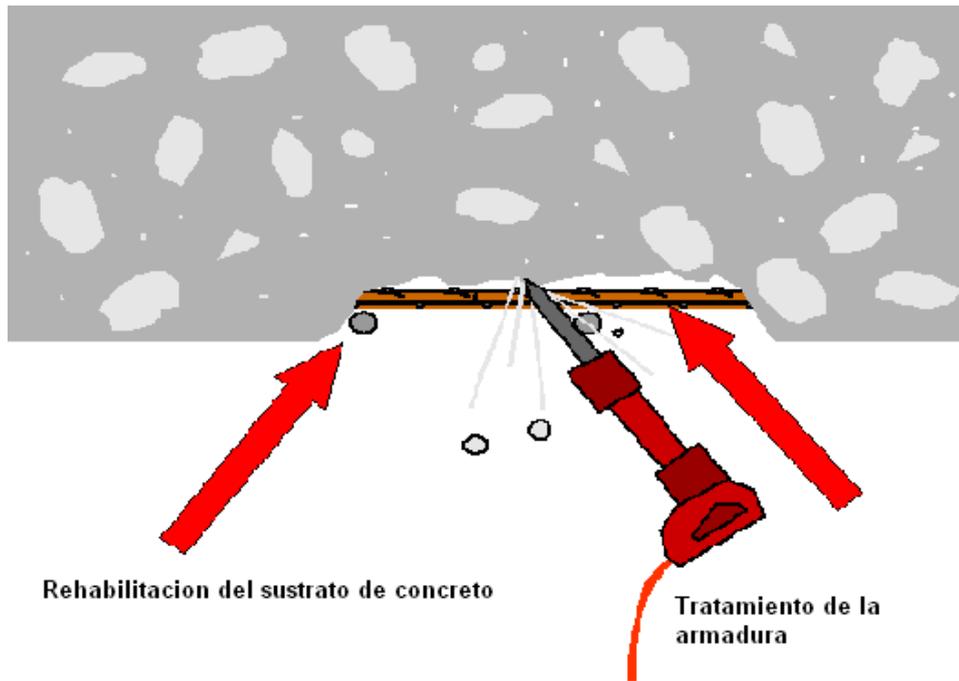
### **2.1 Preparación previa a la aplicación de refuerzo**

Es necesario hacer una inspección visual de la superficie del concreto, evaluando el estado de la viga donde se aplicara el sistema, así como presencia de grietas, oquedades, o imperfecciones del concreto, las cuales deben ser resanadas estructuralmente para poder tener una superficie optima para la aplicación del sistema.

#### **2.1.1 Evaluación de las características y propiedades requeridas por el sistema de refuerzo.**

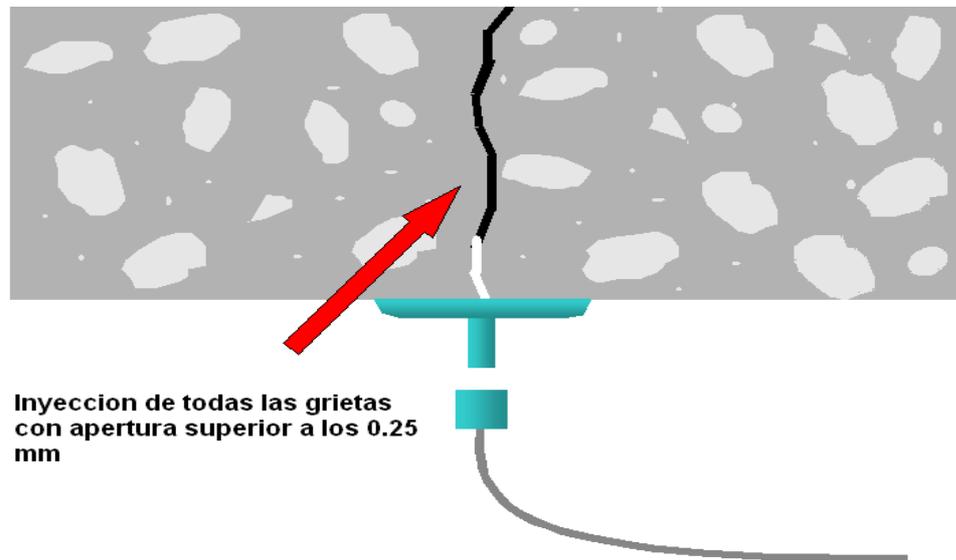
**Características:** Es necesario que el concreto carezca de oquedades, las cuales deben ser resanadas con un mortero de reparación estructural. Si la armadura de acero tuviera algún daño, se le debe dar un tratamiento con un inhibidor de corrosión, el cual sirve a su vez como puente de adherencia con el mortero estructural de reparación.

**Figura 8. Rehabilitación del concreto**



Es indispensable a su vez la ausencia de grietas en el concreto, las cuales deben ser inyectadas con una resina epóxica de baja viscosidad. Se deben considerar siempre y cuando superen una apertura de 0.25 mm.

**Figura 9. Inyección epóxica**



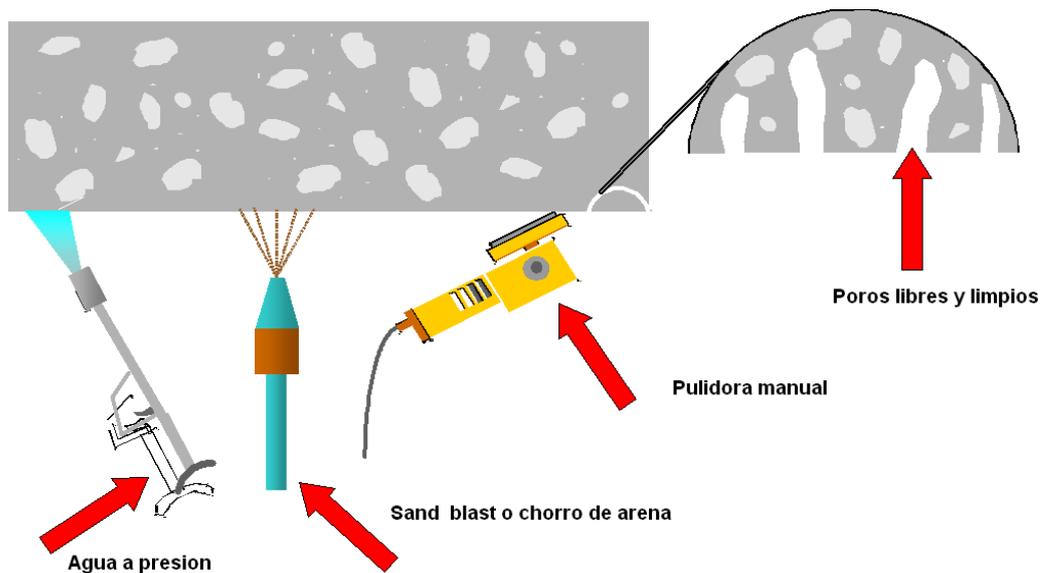
**Propiedades requeridas:** La resistencia a compresión mínima del concreto para aplicar este sistema de refuerzo es  $15 \text{ N/mm}^2$  (2,000 psi). Es necesario aplicar un ensayo no destructivo en las vigas a reforzar, utilizando por ejemplo un martillo esclerométrico para evaluar la resistencia a compresión del concreto.

### **2.1.2 Limpieza de la superficie de concreto**

Gran parte del éxito del sistema de refuerzo es la adherencia que éste tenga con el sustrato de concreto, por lo que la limpieza profunda y el perfil de anclaje a lograr, son indispensables para el funcionamiento del sistema. Existen varios métodos para lograr una limpieza profunda en la superficie del concreto, como limpieza con agua a presión, agua con arena a presión (Sand blast) y pulido abrasivo con un pulidor manual; estos logran que los poros del concreto queden

abiertos y limpios para que sea allí donde se deposite la resina epóxica que adhiere las barras al concreto.

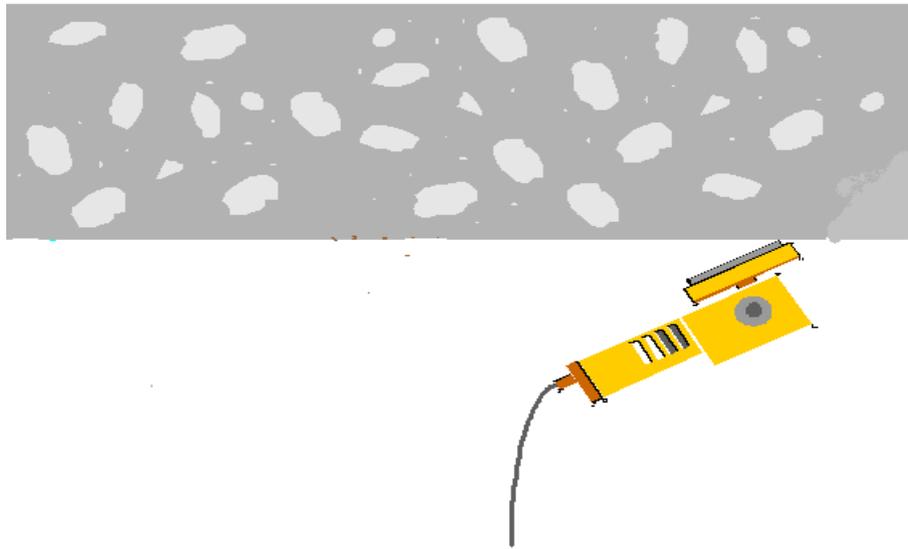
**Figura 10. Limpieza y preparación de superficie**



### **2.1.3 Espacio para colocación de barras.**

Con una pulidora manual se hace una ranura, con un ancho de 6 mm., y una profundidad de 19 mm., mayor que el largo de la barra. El largo se calcula en función al incremento de la resistencia a flexión, pero no excede la zona de flexión que marca la curva elástica de la viga, debiendo hacerse en la cara inferior de la viga, al centro de la misma.

**Figura 11. Espacio para colocación de barras**

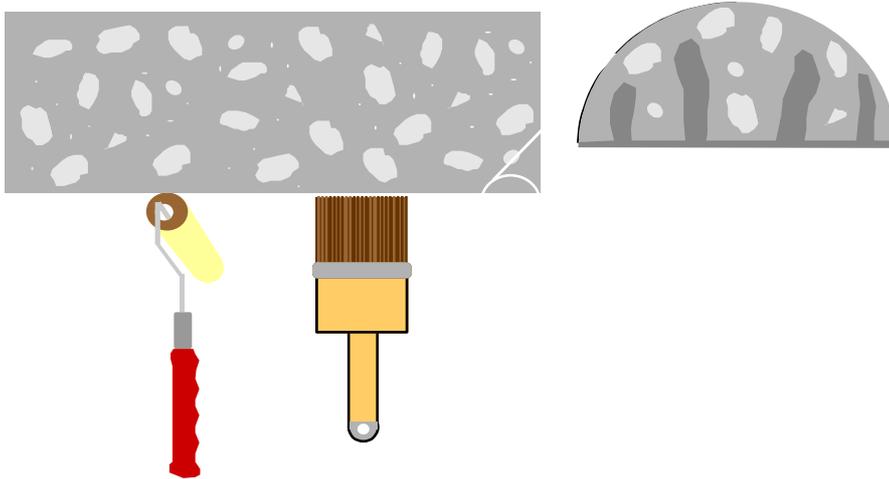


## **2.2 Secuencia de aplicación de los componentes del sistema de refuerzo**

### **2.2.1 Imprimación epóxica en ranura**

Se coloca el adhesivo estructural o resina epóxica dentro de la ranura a manera de llenar los poros del concreto y tener un recubrimiento total de la barra a insertar.

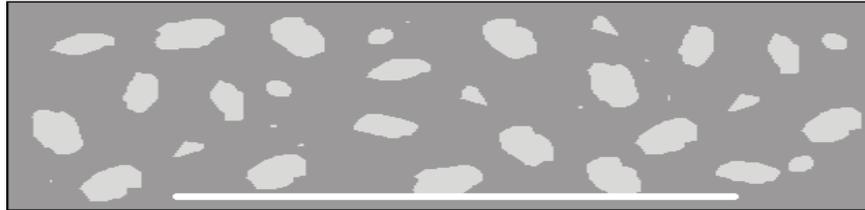
**Figura 12. Imprimación epóxica**



### **2.2.2 Colocación de barras**

Se introduce la barra de fibra de carbono dentro de la ranura, se remueve el exceso de resina epóxica y luego se recubre la barra de manera que ésta quede totalmente adentro, cubierta totalmente de resina.

**Figura 13. Colocación de barra**



**Colocacion de barra en ranura**

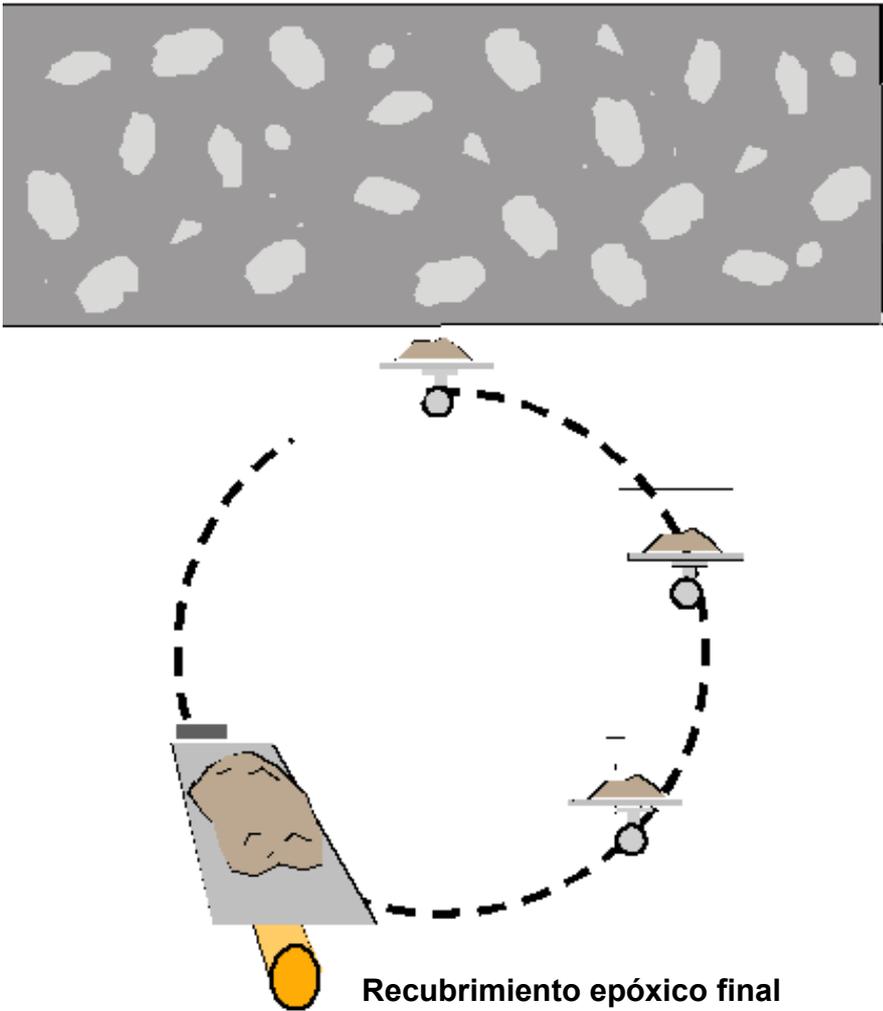
### **2.2.3 Recubrimiento epóxico final**

Para el recubrimiento final se recubre alrededor de la ranura con una cinta adhesiva para evitar exceso de adhesivo, con el fin de lograr el menor impacto estético posible.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> Hoja Técnica Mbar; Publicaciones Master Builders, Ohio USA, 2003; p. 1-2.

Figura 14. Recubrimiento epóxico final



### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Investigación bibliográfica**

#### **3.2 Diseño del experimento**

1. Se elaboraron diez vigas de concreto armado; de las cuales se reforzaron con fibra de carbono únicamente cinco.
2. Seguidamente estas vigas se ensayaron a flexión en el laboratorio, utilizando máquina universal de carga.
3. Se aplicó carga a cada una de las vigas, hasta llevarlas a la ruptura.
4. Se obtuvieron datos de las diez vigas, los cuales fueron comparados y analizados.



## **4. ELABORACIÓN DE VIGAS MUESTRA**

### **4.1 Características de vigas de concreto armado**

Para el ensayo se elaboraron cinco vigas de sección rectangular de 10 cm. de ancho por 15 cm. de alto, de concreto armado. Se utilizó concreto con una resistencia a la compresión de 21 N/mm<sup>2</sup> (3,000 psi), reforzadas con acero grado 40, con una resistencia a la tensión de 140 N/mm<sup>2</sup> (20,000 psi), un armado de 4 varillas longitudinales No. 3 y estribos No. 2 a cada 7 cm., en una longitud medida desde cada uno de los extremos de 70 cm.

### **4.2 Características de vigas de concreto armado, reforzado con fibra de carbono**

Las cinco vigas poseen las mismas características que las cinco vigas anteriores, más un refuerzo con una barra de fibra de carbono de 51 cm., de largo, colocada en el área de tensión máxima de la viga.

### **4.3 Materiales utilizados**

- a) Concreto 21 N/mm<sup>2</sup> (3,000 psi) con agregado grueso de  $\frac{3}{4}$ " de roca caliza, agregado fino de  $\frac{1}{4}$ " y aditivo acelerante de resistencia. El concreto pre mezclado proporcionado por una empresa concretera nacional.

- b) Acero grado estructural 40, con una resistencia de  $140 \text{ N/mm}^2$  (20,000 psi).
- c) Como formaleta, tabla de pino con desencofrante para madera.
- d) Fibra de carbono en barras de 51 cm., de largo, para el refuerzo de las vigas.
- e) Resina epóxica para adherir al concreto las barras de fibra de carbono.

#### **4.4 Equipo utilizado**

- b. Vibrador de aguja de 26 mm., para compactación del concreto.
- c. Cilindros de ensayo para corroborar resistencia del concreto.
- d. Curador blanco para curado durante el fraguado de las vigas.
- e. Pulidora manual con disco de diamante, para corte de las ranuras para colocación de resina y barras de fibra de carbono.
- f. Barreno de baja revolución, para mezclado de los dos componentes de resina epóxica.
- g. Espátula de hule blando para aplicación de resina epóxica.
- h. Máquina Universal marca Baldwin con capacidad de presión máxima de  $5,300 \text{ N/mm}^2$  (780,000 psi), para ensayo a flexión de las vigas.

#### **4.5 Dimensiones de las vigas**

De acuerdo al equipo de laboratorio a utilizar, las vigas se elaboraron con un largo de 155 cm., una base de 10 cm., y una altura de 15 cm. Se diseñó un recubrimiento mínimo de concreto sobre el acero de 3 cm.

#### 4.6 Diseño teórico estructural de las vigas

Con el diseño teórico efectuado, se obtuvieron los siguientes resultados:

1. Carga máxima teórica a soportar por la viga 5,000 Kg.
2. El peso propio de cada viga de 54 Kg., considerando un peso unitario del concreto de  $2,400 \text{ kg/m}^3$ .
3. El peralte efectivo de la viga de 12 cm.
4. El cortante máximo y magnitud de las reacciones, las cuales son iguales debido a la simetría de la viga de 2,500 Kg.
5. El momento flexionante máximo de 187,500 Kg-cm.
6. El área de acero total requerido por tensión resultante de  $2.25 \text{ cm}^2$ , por lo que con 4 varillas No. 3, suman  $2.83 \text{ cm}^2$ , siendo este el refuerzo utilizado.
7. El esfuerzo cortante unitario real de  $16.67 \text{ kg/cm}^2$ , este es el esfuerzo cortante unitario que debe resistirse a través de estribos.
8. El espacio en el cual se requieren estribos es de 71 cm., en cada uno de los extremos.
9. El espaciamiento entre estribos es de 6 cm., en la longitud de la viga donde se requieren estribos, el primero se coloca de 3 cm de cara al apoyo. Son un total de 12 estribos de cada extremo de la viga.<sup>10</sup>
10. El esfuerzo real de adherencia de  $19.8 \text{ kg/cm}^2$ .

---

<sup>10</sup> Parker, Harry; Diseño Simplificado de Concreto Reforzado; 3ª Edición; Limusa; México 1971; p. 111 – 116.

**Figura 15. Elaboración de vigas de concreto armado**



**Figura 16. Curado de vigas de concreto armado**



#### 4.7 Diseño de refuerzo con barras de fibra de carbono

Se utilizó el software para cálculo de refuerzo con fibra, de la siguiente manera:

- Ingreso de datos generales de la viga: resistencia a compresión y densidad del concreto, resistencia a tensión del acero, sección rectangular y longitud de la viga, momento flexionante máximo, peralte de la viga, número de varillas de acero longitudinal, área de acero y número de estribos.
- El software calcula la capacidad resistente “real” de la viga.
- Al ingresar la capacidad resistente “deseada”, el software calcula el área de fibra de carbono y la longitud a reforzar.

Figuras 17 y 18. Software para cálculo de área de refuerzo

degussa  
Proyecto Verificación Informe

Haga clic aquí para habilitar

**Datos Generales**  
Resistencia del Hormigón :  
fck = 21 MPa  
Tipo de acero :  
CA-40

Sección Transversal  
 Sección Rectangular  
 Sección T

Armad. de Piel  
2 Capas  
 Armaduras Dif.

OK

Diagrama de la sección transversal con barras de refuerzo:  $d'$ ,  $H$ ,  $d''$ ,  $bw$ ,  $As_{Sup}$ ,  $As_1$ ,  $As_2$ ,  $As_n$ ,  $As_{Inf}$ .

bw= 10 H= 15  
hf=      bf=  
d'= 12 d''= 3  
Medidas en cm

degussa  
Proyecto Verificación Informe

Haga clic aquí para verificar

**Verificación a Flexión**

Digite los esfuerzos de Servicio debido :

Carga Permanente		Carga Total	
Mq =	1 KN.cm	Mt =	24000 KN.cm
Ng =	0 KN	Nt =	0 KN

Momentos con tracción en la parte inferior de la sección deben ser digitados con signo POSITIVO  
Si Mg = 0, será adoptado Mg = 60 % de Mt

OK

Diferencia del momento = 5357.00 KN.cm

Verificar ABACO

**RESULTADO DEL REFUERZO :**

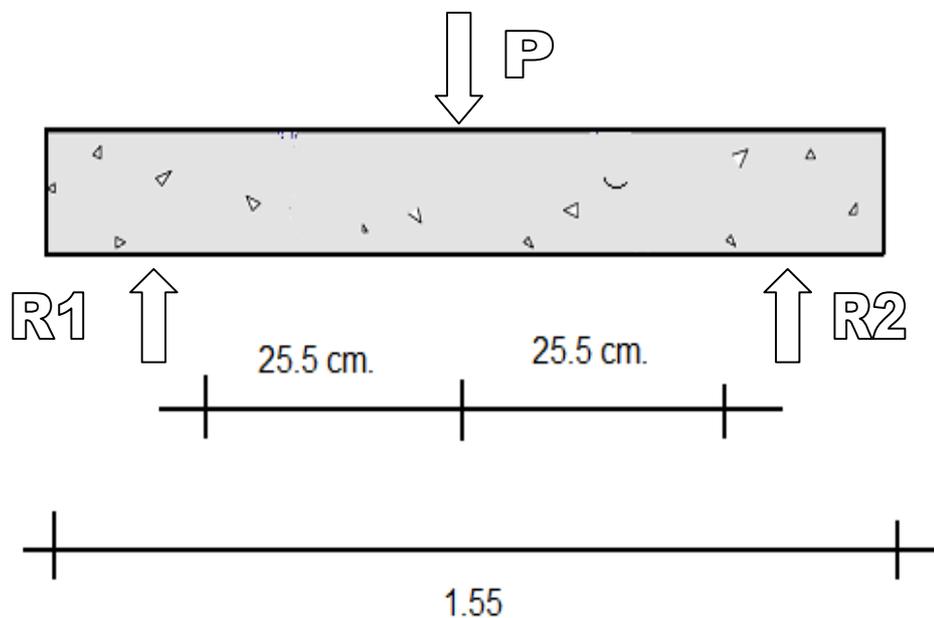
Area de fibra = 0.51 m  
Factor de Eficiencia Km = 0.90 para 1 capas

Tomando en cuenta la sección rectangular de las barras, 2 mm de ancho por 16 mm de alto, se utilizó una barra por viga colocada en el centro de la misma, empotrada con resina epóxica a lo largo de la zona de tensión máxima.

Según los datos generados por el software de cálculo de refuerzo estructural con fibra de carbono, la longitud total a reforzar es de 0.51 metros. Las barras se cortaron a dicha longitud y se incrustaron en el concreto a 0.255 metros del centro hacia los extremos de la fibra de carbono.<sup>11</sup>

Al respecto del software indicado, los derechos reservados del mismo no permiten determinar ni especificar el algoritmo de cálculo utilizado.

**Figura 19. Diagrama para colocación de barras de fibra de carbono**



<sup>11</sup> DegussaV01; Software para cálculo de refuerzo estructural con fibra de carbono; versión 2005.

## **5. ENSAYOS DE LABORATORIO**

No existen ensayos normalizados de los sistemas de refuerzo con fibra de carbono para estructuras de hormigón, metal o madera utilizando laminados de carbono. Existen una serie de informes sobre estudios individuales efectuados por diversas instituciones.

### **5.1 Métodos de ensayo**

Basados en la norma ASTM C 293 – 02 “Método de prueba para determinar la resistencia a flexión del concreto (Usando una viga simple con carga puntual aplicada en el centro de la misma)”, el ensayo adecuado es el de flexión, con una luz de 130 cm., entre apoyos, aplicando una carga puntual al centro de la viga. El ensayo se lleva a cabo en una máquina universal de carga.

**Figura 20. Ensayo de flexión en viga de concreto armado**



## **5.2 Estimación de cargas de ensayo**

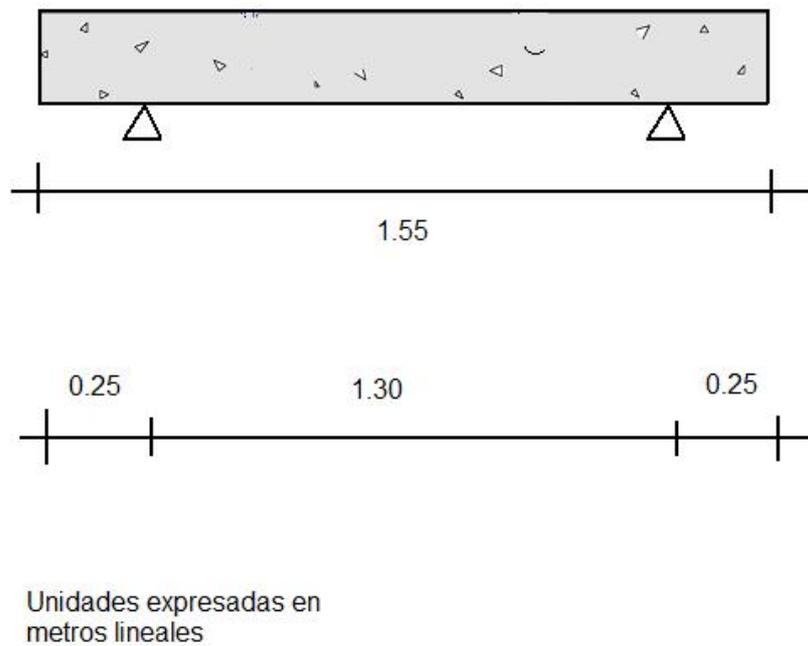
Debido a que el ensayo requiere resultados comparativos a flexión, se reforzaron las vigas a corte, para inducir la falla a flexión pura.

Las cargas de ensayo parten de la carga máxima determinada en el diseño teórico para cada una de las vigas, así como el incremento proyectado de la resistencia a flexión proporcionado por la fibra de carbono. La carga máxima teórica estimada de diseño parte de 5000 Kg.

### 5.3 Procedimiento de ensayo

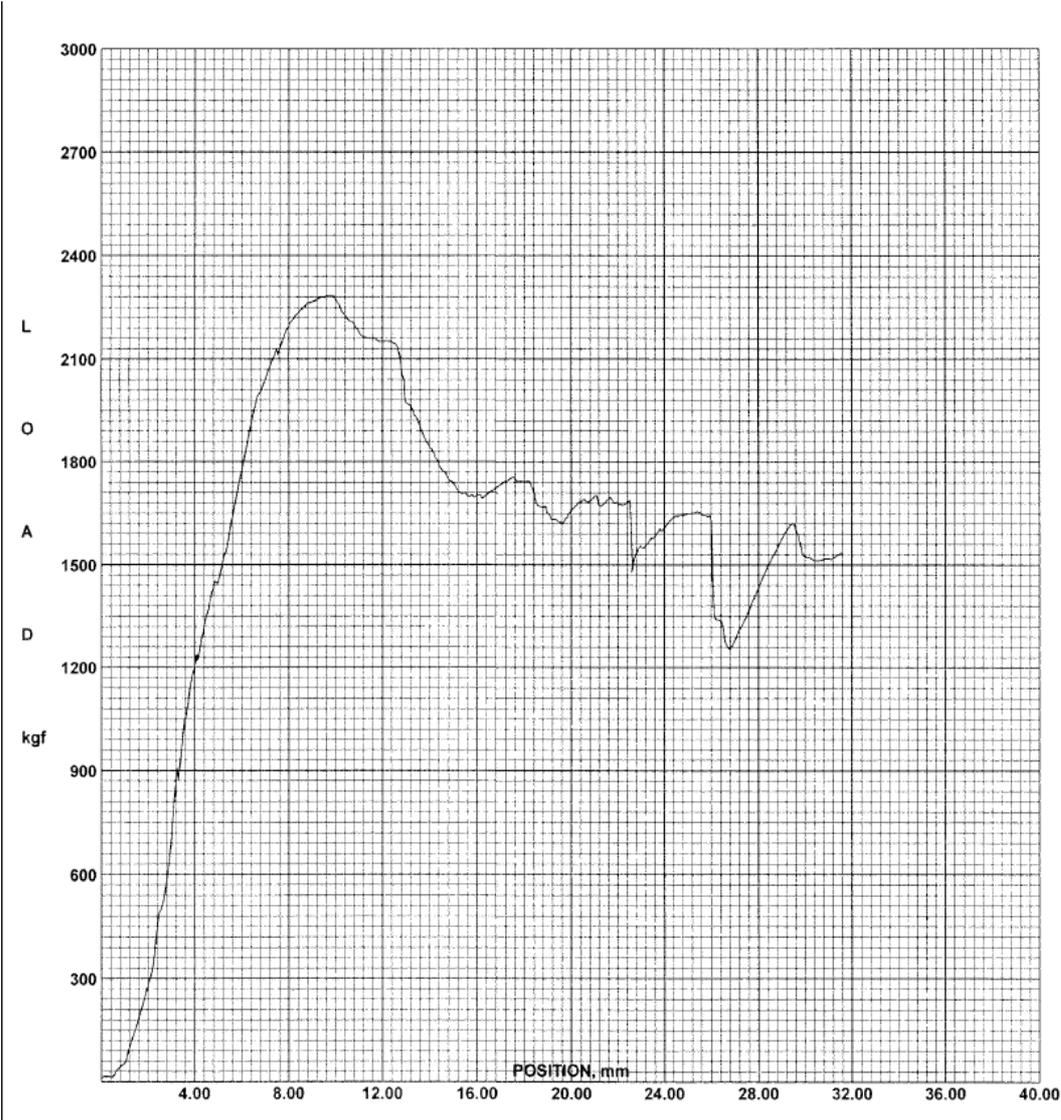
1. Colocación y alineación de vigas en máquina universal de carga.

**Figuras 21. Diagrama de procedimiento de ensayo**



2. Velocidad de aplicación de la carga 12 kgf/segundo.
3. Gráfica Carga – Deflexión, generada por máquina universal de carga.

Figura 22. Gráfica carga – deflexión



## **6. RESULTADOS OBTENIDOS**

### **6.1 Tabulación de resultados**

Se hace la comparación de resultados entre las vigas sin fibra y las vigas con fibra de carbono, analizando la carga máxima permisible, las deformaciones máximas y el módulo de ruptura promedio de las vigas ensayadas.

El dato de comparación a utilizar es el módulo de ruptura promedio, para verificar significativamente el incremento proporcionado por las barras de fibra de carbono.

Para el análisis estadístico de los resultados, se utilizó un porcentaje máximo de variación de 15%, corrigiendo de esta manera los promedios, para ofrecer resultados más confiables.

Tabla II. Vigas sin refuerzo de fibra de carbono

<b>VIGAS SIN REFUERZO DE FIBRA DE CARBONO</b>				
No.	CARGA MAX $P_{max}$ (Newtons)	DEFLEXIONES		MODULO RUP. $M_{\text{máximo}}$ (N/mm <sup>2</sup> )
		$M_{\text{máxima}}$ (mm.)	Rotura (mm.)	
1	16,632.08	11.00	17.91	3.14
2	17,142.03	14.60	20.70	2.94
3	15,641.61	18.20	21.70	2.65
4	17,642.17	18.50	47.80	3.04
5	14,611.91	11.20	17.50	2.55
PROM	16,333.96	14.70	25.12	2.86
DESV. ST.	2,450.09	2.21	3.77	0.43
% V	15	15	15	15
<b>PROM</b>	<b>16,333.96</b>	<b>14.60</b>	<b>21.70</b>	<b>2.86</b>

Tabla III. Vigas con refuerzo de fibra de carbono

<b>VIGAS CON REFUERZO DE FIBRA DE CARBONO</b>				
No.	CARGA MAX $P_{max}$ (Newtons)	DEFLEXIONES		MODULO RUP. $M_{\text{máximo}}$ (N/mm <sup>2</sup> )
		$M_{\text{máxima}}$ (mm.)	Rotura (mm.)	
1	20,888.17	8.00	32.10	3.53
2	22,359.17	10.00	31.60	3.82
3	28,066.64	16.00	35.00	3.14
4	29,331.70	16.00	38.40	3.33
5	24,045.91	7.60	28.00	4.02
PROM	24,938.32	11.52	33.02	3.57
DESV. ST.	3,740.75	1.73	4.95	0.54
% V	15	15	15	15
<b>PROM</b>	<b>25,950.85</b>	<b>10.00</b>	<b>32.90</b>	<b>3.57</b>

Tabla IV. Comparación por módulo de ruptura

COMPARACIÓN DE RESULTADOS				
	VIGAS SIN BARRAS	VIGAS CON BARRAS	INCREMENTO	
No.	MÓDULO RUP. (N/mm <sup>2</sup> )	MÓDULO RUP. (N/mm <sup>2</sup> )	ABSOLUTO (Newtons)	RELATIVO (%)
<b>PROM</b>	<b>2.86</b>	<b>3.57</b>	<b>0.71</b>	<b>19.7</b>

Tabla V. Comparación por carga máxima

COMPARACIÓN DE RESULTADOS				
	VIGAS SIN BARRAS	VIGAS CON BARRAS	INCREMENTO	
	CARGA MAX	CARGA MAX		
No.	Pmax (Newtons)	Pmax (Newtons)	ABSOLUTO (Newtons)	RELATIVO (%)
<b>PROM</b>	<b>16,333.96</b>	<b>25,950.85</b>	<b>9,616.89</b>	<b>37.0</b>

## 6.2 Gráficas Comparativas

Figura 23. Gráfica de comparación por módulo de ruptura

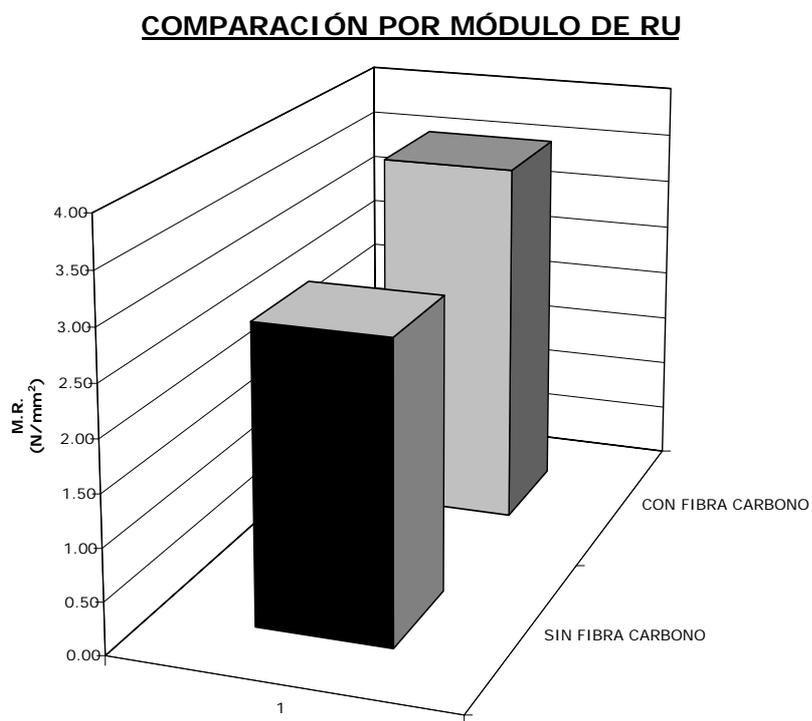


Figura 24. Gráfica de comparación por carga máxima permisible

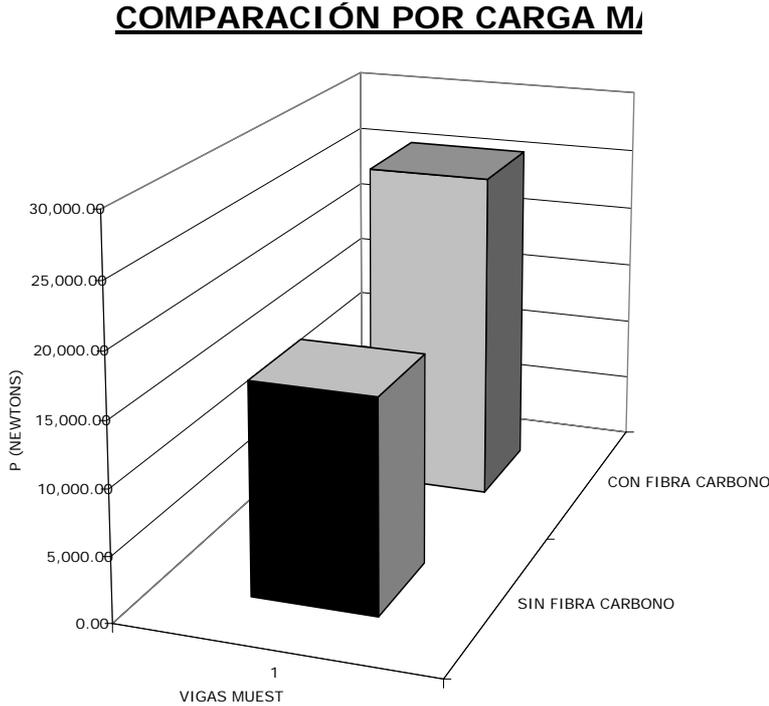


Figura 25. Gráfica de comparación por deflexión máxima

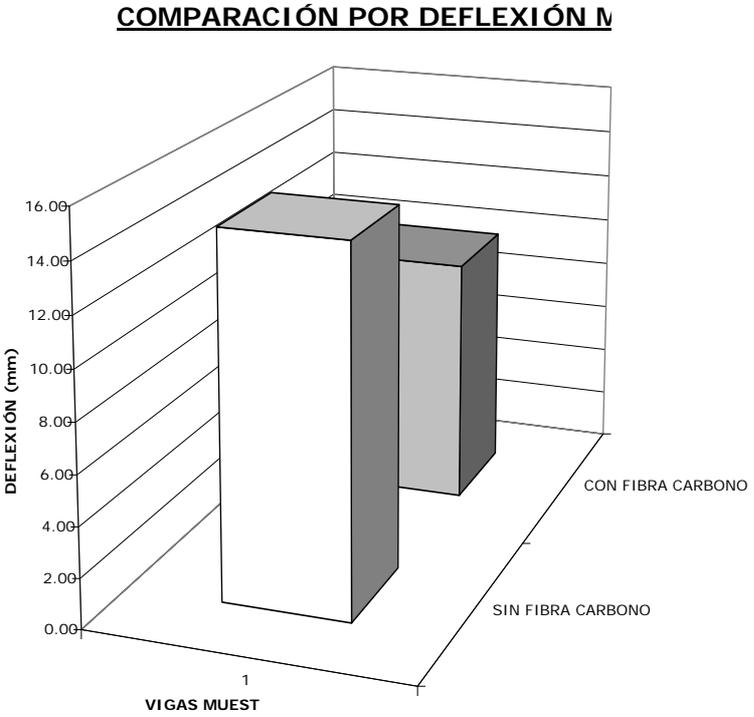
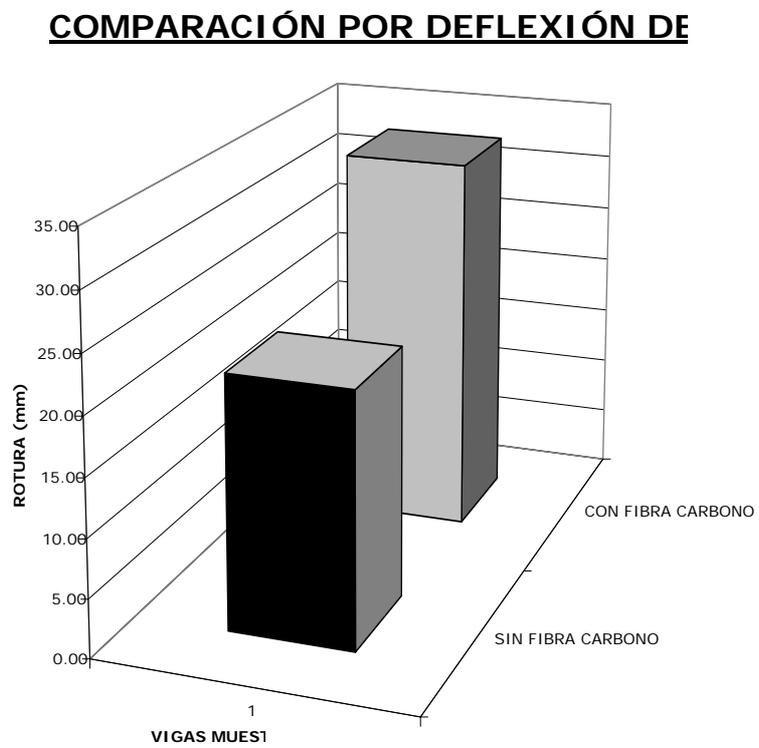


Figura 26. Gráfica de comparación por deflexión de rotura



### 6.3 Fallas por flexión

En las fotografías abajo detalladas, se pueden notar las diferencias que presentan las fallas en el punto de flexión de la viga.

**Figura 27. Ensayo en viga sin refuerzo de fibra de carbono**



**Figura 28. Ensayo en viga con refuerzo de fibra de carbono**



**Figura 29. Ensayo en viga sin refuerzo de fibra de carbono**



**Figura 30. Ensayo en viga con refuerzo de fibra de carbono**



## 6.4 Discusión de resultados

Al analizar las tablas II y III, se observan las diferencias que refleja el refuerzo de fibra de carbono en los siguientes aspectos:

1. Incremento considerable en la carga máxima permisible.
2. Disminución de la deflexión máxima de las vigas.
3. Aumento en la deformación de rotura.
4. Incremento del módulo de ruptura de las vigas.

En las tablas IV y V se integra un resumen de los incrementos de módulo de ruptura y carga máxima permisible, a manera de representarlos con números absolutos y relativos. Los datos obtenidos están contenidos dentro de una desviación estándar confiable, y el porcentaje de variación esperado para los resultados de las pruebas con las vigas usadas como muestra.

Por fines ilustrativos y de rápida interpretación, se presentan gráficas que ofrecen una clara diferencia entre las vigas sin fibra de carbono y las vigas que contienen la fibra como refuerzo a flexión.

La falla reflejada por las vigas sin fibra de carbono es inducida exactamente en el punto de flexión de la viga, sucediendo en todas las vigas ensayadas. En las vigas reforzadas con fibra de carbono, la falla es inducida hacia la zona de corte, exactamente en los extremos de la barra de fibra de carbono contenida en la viga. Se puede observar en las vigas con fibra de carbono, la ausencia de grietas en el área de flexión.

Como resultado, si se deseara dar aún mayor resistencia a una viga, puede reforzarse en la zona de corte, utilizando una tela envolvente de fibra de carbono, colocada en forma de "U", esto contrarrestará la falla visualizada en

las fotografías 8 y 10. También es posible colocar el refuerzo a corte en sentido contrario a la falla de corte, es decir perpendicular a la falla, en una secuencia diagonal.



## 7. EXPERIENCIAS

### 7.1 Experiencias en Guatemala

#### 7.1.1 Torre pre - calentadores, cementera guatemalteca

PROBLEMA: Incremento de cargas portantes (vivas y muertas).

SOLUCIÓN: Refuerzos a corte en los nudos de los marcos, refuerzos a corte en vigas, refuerzo por confinamiento en columnas y refuerzo a flexión en vigas.

**Figura 31. Refuerzo en edificio de planta cementera**



### **7.1.2 Centro comercial en Mazatenango**

PROBLEMA: Incremento de carga, debido a instalación de gradas eléctricas apoyadas sobre las vigas.

SOLUCIÓN: Refuerzo a flexión en vigas, sin interrupción de operaciones comerciales.

**Figuras 32 y 33. Refuerzo en edificio centro comercial, en plenas operaciones comerciales**

QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.



### **7.1.3 Aeropuerto La Aurora**

PROBLEMA: Incremento de carga debido a remodelación y fatiga.

SOLUCIÓN: Refuerzo por confinamiento en columnas, con esto se evitó aumentar sección circular de las columnas.

**Figuras 34 y 35. Refuerzo columnas circulares Aeropuerto Internacional La Aurora**

QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

QuickTime™ and a decompressor are needed to see this picture.

#### 7.1.4 Edificio en zona 14 Ciudad de Guatemala

PROBLEMA: Baja resistencia a compresión en el concreto.

SOLUCIÓN: Refuerzo en el área de flexión y corte en vigas y por confinamiento en las columnas.

**Figuras 36 y 37. Refuerzo en edificio zona 14 capitalina**



## 7.2 Experiencias en otros países

### 7.2.1 Edificio de Secretaría de Hacienda, Belo Horizonte, Brasil.

PROBLEMA: Mal diseño y falta de refuerzos transversales de la estructura.

SOLUCIÓN: Levantamiento del edificio con gatos hidráulicos y refuerzo con barras de fibra de carbono. Obtuvo premio de “Excelencia en Refuerzo”, Categoría Edificios en el año 2003.

**Figuras 38 y 39. Refuerzo a flexión con barras de fibra de carbono, en losas deflectadas.**



### 7.2.2 Puente en cementera La Farge, Italia.

PROBLEMA: Aumento de carga de camiones Off Road, de 19 a 46 toneladas métricas.

SOLUCIÓN: Refuerzo a flexión en losa y vigas de puente.

**Figuras 40 y 41. Refuerzo en puente de planta cementera**



### **7.2.3 Silos en cementera Blue Circle Cement, Georgia, USA.**

PROBLEMA: Grietas estructurales y desportillamientos en el concreto, esto debido a la insuficiencia de acero de refuerzo vertical y circunferencial.

SOLUCIÓN: Refuerzo vertical y circunferencial con barras de fibra de carbono. Ganador del Premio a la Excelencia en Refuerzo, en la Categoría de Industria en el año 2000.

**Figura 42. Refuerzo en silos de planta cementera**





## CONCLUSIONES

1. El sistema de barras de fibra de carbono incrementa 20% el módulo de ruptura de una viga de concreto armado, con ventajas de bajo impacto estético y rápida aplicación, incluso en edificaciones en funcionamiento. Sin embargo se puede obtener mejores resultados, combinando con un refuerzo en la zona de corte de las vigas.
2. En las vigas sin fibra de carbono se pudo observar que la falla ocurrió exactamente al centro de las vigas, a diferencia de las vigas con refuerzo de fibra de carbono, en las que la falla era inducida hacia los extremos de la fibra, fallando la viga en la zona de cortante máximo.
3. En vigas de concreto armado, con daños severos o resistencias a compresión en el concreto debajo de 21 Mpa, las barras de fibra de carbono pueden desprenderse o fallar por falta de adherencia.
4. Las barras de fibra de carbono son exclusivamente para refuerzo a flexión en vigas o en muros de corte.
5. En Guatemala, las barras de fibra de carbono ya representan una de las primeras opciones propuestas por los ingenieros estructurales, por su alto desempeño en materia de incrementos de resistencias para estructuras.



## RECOMENDACIONES

1. Para la utilización del sistema, es necesario que el concreto tenga una resistencia mínima de  $15 \text{ N/mm}^2$ , esto para garantizar la adherencia del refuerzo al concreto.
2. Debido a que una viga reforzada a flexión con fibra de carbono, induce la falla hacia la zona de cortante máximo, se recomienda reforzar a corte con tela de fibra de carbono envolvente, si se deseara incrementar aún más la resistencia y desempeño de una viga.
3. No es aconsejable usar el refuerzo de barras de fibra de carbono, cuando el concreto ha sufrido daños severos, o el acero presente corrosión total.
4. No es recomendable reforzar columnas con barras de fibra de carbono; para estos casos deberá utilizarse un tipo de fibra en tela envolvente.
5. Cuando exista por diversas causas, un incremento de cargas sobre una viga, cuyo diseño original no las haya contemplado, se recomienda el uso de barras de fibra de carbono.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Canadian Standards Association. Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers. Canadá: mayo 2002.
2. Franco Flores, José Víctor. Refuerzo de estructuras de concreto con tejidos de fibra de carbono. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala: mayo 2002.
3. Instituto Americano del Concreto. Código de Requerimientos Para Construcción de Concreto Estructural (ACI 318-05). USA: 2005.
4. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials. 3ª. Ed. El Japón: 2006.
5. Manual Guía Compuesta de Diseño Estructural. 2ª Ed. Ohio USA: Publicaciones Master Builders, 1998.
6. Nilsson, Arthur H. Diseño de Estructuras de Concreto. 12ª. Ed. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw Hill, 2005.
7. Parker, Harry. Diseño Simplificado de Concreto Reforzado. 3ª. Ed. México D.F.: Limusa – Wiley, 1971.
8. Revista Sistemas de Preservación Estructural. 2ª. Ed. Maryland USA: Publicaciones Master Builders, 2001. 23 p.