

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil



UTILIZACIÓN DE FIBRA DE CARBONO PARA EL REFORZAMIENTO DE
EDIFICACIONES APLICADO A UNA ESTRUCTURA REAL,
COLEGIO AMERICANO DE GUATEMALA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO
POR ELIAS ROBERTO ARANGO HERRERA PARA OPTAR
AL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERIA CIVIL

Guatemala
2006

UTILIZACIÓN DE FIBRA DE CARBONO PARA EL REFORZAMIENTO DE
EDIFICACIONES APLICADO A UNA ESTRUCTURA REAL,
COLEGIO AMERICANO DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil



UTILIZACIÓN DE FIBRA DE CARBONO PARA EL REFORZAMIENTO DE
EDIFICACIONES APLICADO A UNA ESTRUCTURA REAL,
COLEGIO AMERICANO DE GUATEMALA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO
POR ELIAS ROBERTO ARANGO HERRERA PARA OPTAR
AL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERIA CIVIL

Guatemala
2006

RESUMEN

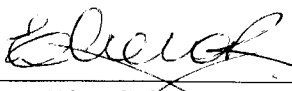
En los últimos años se han realizado una serie de avances tecnológicos en el área de la ingeniería estructural, siendo uno de los más exitosos el uso de la fibra de carbono, derivado de la necesidad de reforzar estructuras existentes, que se han deteriorado con el tiempo, han sufrido daño mal intencionado, sujetos a cargas excesivas o expuestas a eventos sísmicos, huracanes u otros eventos naturales.

Derivado de esta necesidad se desarrolló la fibra de carbono, material que tiene ciertas propiedades especiales; que utilizadas en ciertas estructuras, puede ser capaz de restituirle a diferentes elementos la capacidad perdida por las razones expuestas anteriormente y en algunos casos, incrementar la capacidad a la flexión, cortante o carga axial, restablecimiento de la capacidad portante de estructuras deterioradas, corrección de errores de diseño o construcción, incremento de la ductilidad, mejora de la resistencia a fatiga y por último el control de agrietamiento de las estructuras de concreto.

La utilización de este material se ha difundido a una gran velocidad en todo el mundo debido a la facilidad constructiva que lo caracteriza, la limpieza de su aplicación y las propiedades intrínsecas al mismo, que le dan una gran resistencia a la tensión.

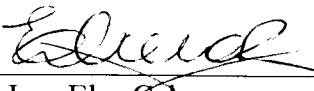
Una aplicación reciente de este tipo de reforzamiento preventivo se llevo a cabo en el Colegio Americano de Guatemala y el mismo se utilizó para documentar este trabajo de investigación.

Vo.Bo. :

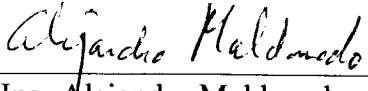
(f) 

Ing. Elsa Cabrera
Colegiado 5168

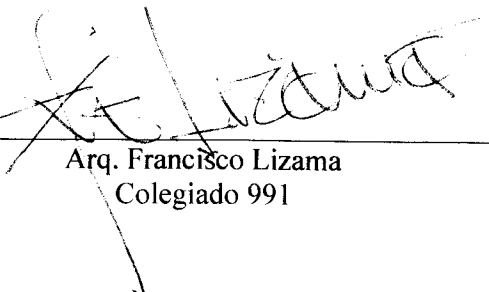
Tribunal:

(f) 

Ing. Elsa Cabrera
Colegiado 5168

(f) 

Ing. Alejandro Maldonado
Colegiado 3484

(f) 

Arq. Francisco Lizama
Colegiado 991

Fecha de Aprobación: 6 de diciembre del 2006

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	iv
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	2
III. DESARROLLO DE LA FIBRA DE CARBONO.....	3
IV. PRUEBAS Y CONTROL DE CALIDAD.....	7
V. PROPIEDADES MECÁNICAS.....	11
VI. APLICACIONES	17
A. Estructuras existentes sin daño.....	17
B. Estructuras dañadas.....	18
C. Estructuras especiales.....	19
VII. TIPOS DE REFORZAMIENTO.....	21
A. Refuerzo a flexión.....	21
B. Refuerzo a corte.....	22
C. Refuerzo a carga axial.....	24
D. Incremento de ductilidad	26
E. Corrección de errores de diseño o construcción	26
VIII. PLANEACIÓN Y DISEÑO.....	27
A. Proceso de diseño	27
B. Diagrama de flujo de diseño y construcción del sistema FRP ...	28

C. Detallado de diseño	28
D. Diseño de secuencia constructiva.....	29
IX. APLICACIÓN ESPECIFICA.....	35
A. Planificación de la ejecución.....	35
B. Preparación de superficie	44
C. Aplicación final.....	44
D. Secuencia grafica.....	45
X. PROBLEMAS DEL SISTEMA.....	67
A. Problemas observados.....	67
B. Ventajas y desventajas del sistema.....	67
XI. VALUACIÓN DEL USO DE LA FIBRA.....	69
XII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	70
XIII. CONCLUSIONES.....	72
XIV. RECOMENDACIONES.....	73
XV. BIBLIOGRAFÍA.....	74

LISTA DE TABLAS

	Pagina
Tablas	
Tabla 1 Propiedades de la Fibra.....	12
Tabla 2 Densidades típicas de los materiales FRP.....	13
Tabla 3 Propiedades del sistema Tyfo Fibrwrap utilizado en el proyecto Colegio Americano	13

LISTA DE FIGURAS

	Pagina
Figuras	
Figuras 1 ASTM D-3039 Prueba de tensión.....	8
Figuras 2 ASTM D-4541 Prueba de adherencia (equipo).....	9
Figuras 3 ASTM D-4541 Prueba de adherencia.....	9
Figuras 4 ASTM D-4541 Prueba de adherencia.....	10
Figuras 5 Propiedades de las láminas de fibra seca.....	13
Figuras 6 Diferentes tipos de FRP con sus diferentes aplicaciones..	14
Figuras 7 Aplicaciones del sistema FRP dependiendo de la dirección de la fibra y su uso	15
Figuras 8 Esfuerzos mínimos de tensión.....	15
Figuras 9 Comparación de esfuerzos entre una sección de concreto reforzada versus una sección confinada con FRP.....	16
Figuras 10 Sección de columna reforzada del Colegio Americano de Guatemala.....	29
Figuras 11 Limpieza de la superficie de concreto.....	30
Figuras 12 Preparación de las bandas de FRP.....	30
Figuras 13 Preparación de la resina.....	31
Figuras 14 Aplicación de la resina sobre la superficie de concreto....	32
Figuras 15 Colocación de la primera banda de FRP.....	33
Figuras 16 Aplicación de la segunda capa de resina con rodillo.....	34
Figuras 17 Aplicación de la segunda capa de resina con espátula.....	34
Figuras 18 Colocación de la segunda banda de FRP.....	35
Figuras 19 Planta y elevación de las columnas del Colegio Americano de Guatemala.....	36
Figuras 20 Estructura original del Colegio Americano de Guatemala..	45

Figuras 21 Remoción de capa vegetal.....	46
Figuras 22 Excavación sobre la zapata.....	46
Figuras 23 Excavación sobre la zapata.....	47
Figuras 24 Preparación final de la columna.....	47
Figuras 25 Estructura original del Colegio Americano de Guatemala..	48
Figuras 26 Escarificación de las columnas.....	48
Figuras 27 Escarificación de las columnas.....	49
Figuras 28 Aplicación de la macilla para dejar la superficie lisa.....	50
Figuras 29 Aplicación de la primera capa de resina epóxica.....	50
Figuras 30 Preparación de la resina epóxica.....	51
Figuras 31 Mezcladora helicoidal.....	51
Figuras 32 Preparación del área de trabajo.....	52
Figuras 33 Mezclando la resina con la mezcladora helicoidal.....	52
Figuras 34 Mezclando la resina con la mezcladora helicoidal.....	53
Figuras 35 Aplicación de la resina epóxica sobre las columnas.....	53
Figuras 36 Aplicación de la resina epóxica sobre las columnas.....	54
Figuras 37 Aplicación de la resina epóxica sobre las columnas.....	54
Figuras 38 Vista de la resina epóxica sobre la columna.....	55
Figuras 39 Preparación de las bandas de FRP.....	55
Figuras 40 Preparación de las bandas de FRP.....	56
Figuras 41 Preparación de las bandas de FRP.....	56
Figuras 42 Aplicación de la resina epóxica sobre las bandas de FRP..	57
Figuras 43 Colocación de la primera capa de FRP sobre la columna..	57
Figuras 44 Colocación de la primera capa de FRP sobre la columna..	58
Figuras 45 Colocación de la primera capa de FRP sobre la columna..	58

Figuras 46 Aplicación de la resina epóxica sobre las bandas de fibra de carbono.....	59
Figuras 47 Colocación de la primera capa de fibra de vidrio sobre la columna.....	59
Figuras 48 Colocación de la primera capa de fibra de vidrio sobre la columna.....	60
Figuras 49 Colocación de la primera capa de fibra de vidrio sobre la columna.....	60
Figuras 50 Aplicación de la segunda capa de resina epóxica sobre las bandas de fibra de vidrio.....	61
Figuras 51 Aplicación de la segunda capa de resina epóxica sobre las bandas de fibra de vidrio.....	61
Figuras 52 Sección de la columna terminada.....	62
Figuras 53 Sección de la columna terminada.....	63
Figuras 54 Sección de la columna terminada.....	63
Figuras 55 Sección de la columna terminada.....	64
Figuras 56 Estructura final del Colegio Americano de Guatemala.....	65
Figuras 57 Sección de la columna terminada.....	65
Figuras 58 Acabado final de las columnas del Colegio Americano de Guatemala.....	66

I INTRODUCCIÓN

En los últimos años la ciencia de la ingeniería, en específico en el área de los materiales, ha investigado nuevos materiales, ya que a lo largo de muchos años básicamente hemos utilizado tres materiales, que han sido imposibles de sustituir, el concreto, el acero y la madera, estos han sido por siglos la base de la ingeniería estructural y de la construcción.

A pesar que se ha tenido un desarrollo sostenido en el uso de estos materiales el mismo ha sido lento, debido a que casi cualquier obra se ha podido diseñar y construir con estos elementos, pero recientemente el hombre ha tenido a la vista proyectos a corto plazo que ya no es posible desarrollar con los materiales actuales, por ello la ingeniería se ha volcado a estudiar otros materiales con mejores propiedades.

Dentro de este tipo de materiales se encuentran las fibras de carbono o vidrio que han empezado a utilizarse con mucho éxito, descubriendo que tienen capacidades mayores que los actuales y se han ensayado e investigado en laboratorio; estos han tenido un desarrollo rápido debido a que se les está utilizando en el reforzamiento de estructuras, en combinación con otros materiales como las resinas que, utilizadas como adhesivo de la fibra, han logrado usarse para mejorar las capacidades de elementos de concreto reforzado, obteniendo unos resultados a corto plazo, pero que aún debe de ser probados con eventos reales.

Debido a que en Guatemala ya se inició con el sistema FRP o reforzamiento con fibra es importante iniciar a difundir el uso correcto del sistema, en este trabajo se presentan los conceptos básicos del uso del sistema y un proyecto concreto de reforzamiento con la fibra en el cual se aplicaron los materiales mencionados a la estructura del Colegio Americano de Guatemala.

II OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es comprender la aplicación correcta de la fibra de carbono.

Los objetivos específicos son:

1. Exponer un trabajo real en proceso como lo es el edificio del Colegio Americano, documentando todo el proceso de reforzamiento, desde la conceptualización, diseño, aplicación directa, problemas reales de instalación, valuación de las aplicaciones y recomendaciones para aplicaciones futuras.
2. Difundir la utilización de la fibra de carbono ya que es de gran beneficio para Guatemala tanto en los edificios actuales, que no tienen daño, pero son vulnerables a eventos sísmicos y conocer la aplicación correcta, después de que la estructura del edificio haya sido afectada.
3. Conocer las ventajas y desventajas en las aplicaciones para valorar las limitaciones de uso en diferentes tipos de estructura y como poder resolver probables problemas.

III DESARROLLO DE LA FIBRA DE CARBONO

En los últimos años se han realizado una serie de avances tecnológicos en el área de la ingeniería estructural, siendo uno de los más exitosos el uso de la fibra de carbono, para reforzar estructuras existentes, que se han deteriorado con el tiempo, han sufrido daño mal intencionado, han estado sujetas a cargas excesivas o expuestas a eventos sísmicos, huracanes u otros eventos naturales.

El sistema de refuerzo FRP fue desarrollado partiendo de la premisa de reforzar estructuras existentes con los materiales tradicionales como el concreto y el acero; utilizándolos sobre las estructuras dañadas por alguna razón mencionada anteriormente, evitando encamisados de concreto, encamisadas con placas de acero, postensión externa que tenían el problema de colocación en lugares poco accesibles o por la posición de los elementos y que adicionalmente se incrementaba la masa de la estructura en cuestión.

En años anteriores se reforzaban las estructuras, pero con muchas complicaciones, costos altos, modificación de las medidas originales y el sobrepeso originado por el nuevo refuerzo.

Para la aplicación de este sistema de reforzamiento fue necesaria la investigación de las propiedades del material y de su comportamiento al estar sometido a diferentes esfuerzos en laboratorio, trabajo intenso analítico y aplicaciones en campo que dieron como resultado la aprobación del sistema de reforzamiento en diferentes tipos de estructuras.

Derivado de esta necesidad se desarrolló la fibra de carbono, material que tiene ciertas propiedades especiales que utilizadas en ciertas estructuras puede ser capaz de restituirle a diferentes elementos la capacidad perdida debido al deterioro que han tenido con el tiempo, cargas excesivas, y en algunos casos incrementar la capacidad a la flexión, cortante o carga axial, restableciendo la capacidad portante de estructuras deterioradas, corrección de errores de diseño o construcción, incremento

de la ductilidad, mejora de la resistencia a fatiga y, por último, el control de agrietamiento en las estructuras de concreto.

Los Polímeros Reforzados con Fibras (FRP por sus siglas en inglés), están formados por fibras de vidrio, carbón, cubiertas por una matriz polimérica (epóxico) para formar un material compuesto. El epóxico va aplicado directamente sobre la capa de concreto para conformar un material compuesto adherido a la estructura existente.

El FRP es un material compuesto ligero, no corrosivo y con una gran resistencia a la tensión. Ha habido un gran interés por este tipo de material debido a su fácil aplicación y las propiedades que tiene. Las fibras y los epóxicos usadas en el sistema FRP son relativamente caras comparadas con los materiales tradicionales como el concreto y el acero, pero el costo de instalación de este sistema es muy bajo comparado con los anteriores. Dicho sistema puede utilizarse en áreas con acceso limitado, donde los sistemas tradicionales no se pueden utilizar o son muy difíciles de aplicar, por lo que se ha convertido en un excelente método alternativo a los materiales tradicionales.

El sistema FRP puede ser usado para rehabilitación o restauración de los diferentes elementos que componen una estructura (vigas, columnas, etc.).

El sistema FRP funciona en el concreto directamente, pero no debe considerarse para aplicarse en elementos estructurales que ya tenga corrosión en el acero de refuerzo o en un concreto que esté deteriorado, antes de aplicar el sistema deberá tratarse el problema mencionado. Las condiciones y los esfuerzos a los que está sometido el elemento estructural deben ser evaluadas para determinar la capacidad del refuerzo adherido FRP.

La resistencia del concreto existente es un parámetro muy importante y crítico para las aplicaciones adheridas, incluyendo los esfuerzos de flexión y cortante. Este parámetro de resistencia debe poseer ciertas características mínimas para desarrollar los esfuerzos de diseño del sistema FRP a través de la adherencia. El esfuerzo de tensión debe ser al menos 200 psi (1.4 Mpa) y se determina usando una prueba de adherencia como lo indica ACI 503R o ASTM D 4541. El sistema FRP no se debe

utilizar en concretos cuya resistencia a la compresión f'_c es menor que 2,500 psi. Las aplicaciones críticas como la envoltura para el confinamiento de las columnas se realizan únicamente cuando el sistema FRP está en perfecto contacto con la superficie de concreto. Los esfuerzos de diseño del sistema FRP se desarrollan por deformación o dilatación de la sección de concreto en contacto.

El sistema FRP no detiene la corrosión del acero de refuerzo, si la corrosión es evidente o la degradación del concreto existe, la colocación del refuerzo con FRP no es recomendada sin haber detenido la corrosión y reparado el concreto degradado.

Los diferentes sistemas FRP consisten en pliegos de fibra o telas secas unidireccionales o multidireccionales las cuales son impregnadas o saturadas con resina, para luego instalar sobre las diferentes superficies de concreto.

1. Fibras secas unidireccionales, son fibras en la que se le aplica al miembro en una sola dirección.
2. Fibras secas multidireccionales, son fibras en las cuales se le aplican al miembro en dos direcciones.

Los materiales que se utilizan actualmente y están accesibles en el mercado en el sistema FRP, son resinas, primers, masillas, saturadores, adhesivos y las fibras, todos estos materiales han sido investigados y desarrollados para ser utilizados en el reforzamiento de elementos estructurales.

A. Resina

Es un adhesivo epóxico de uso estructural de dos componentes, 100% sólido, tolerante a la humedad, de alto modulo y alta resistencia. Entre los principales usos de las resinas esta el utilizarlo como adhesor al concreto, mampostería, acero, madera, sistema FRP, etc. Sus propiedades principales son:

- Resistente a la humedad antes, durante y después del curado.
- Alta capacidad de mortero adhesivo de uso estructural de alta resistencia y alto modulo.

- Alta resistencia al flujo plástico bajo cargas permanentes
- Alta resistencia a la abrasión e impacto

B. Masillas

Las masillas deben utilizarse para rellenar las imperfecciones que queden en la superficie del concreto reforzado, todo esto se hace para que el sistema FRP tenga una capa uniforme para que funcione perfectamente. Rellenando esas imperfecciones ayudan a prevenir que queden burbujas atrapadas dentro de la fibra que pueden hacer que el sistema FRP no funcione correctamente.

C. Resinas saturadas

La resina saturada se utiliza para que la fibra se adhiera y para transferir las cargas cortantes entre las fibras.

D. Adhesivos

Los adhesivos son usados para el PRE-curado del sistema FRP sobre la superficie del concreto.

IV PRUEBAS Y CONTROL DE CALIDAD

El procedimiento para el control de calidad debe estar de acuerdo con ICC ACI 178, << Criterios de aceptación para la verificación e inspección de la Resistencia del Concreto y Mampostería Reforzada y no reforzada usando el sistema de Polímeros Reforzados con Fibras (FRP). >>

A. Control de calidad en la instalación

Debe llevarse un registro diario de la fibra y el epóxico usado durante el mismo así como la localización exacta de los elementos en donde fue utilizada, para su evaluación posterior. La medida del área en pies cuadrados de la fibra y el volumen del epóxico utilizado cada día, con esto se completa el reporte el cual debe ser presentado a la supervisión.

B. Control de calidad en la supervisión

Los supervisores certificados por el proveedor de origen, deben ser las únicas personas autorizadas para efectuar inspecciones periódicas durante todo el proceso de la obra y avalar el reporte, esta inspección debe incluir lo siguiente:

- Inspección de las etiquetas de los materiales
- Preparación de la superficie
- Mezcla del epóxico
- Aplicación del epóxico a la fibra
- Aplicación del sistema compuesto
- Curado del material compuesto
- Preparación y etiquetado de las muestras para laboratorio

El encamisado compuesto debe de ser totalmente inspeccionado por el supervisor autorizado durante la primera aplicación y las subsecuentes. El contratista debe monitorear las mezclas de todos los componentes epóxicos para obtener una relación apropiada y obtener la adherencia recomendada por el fabricante.

C. Pruebas de laboratorio

Del control de los lotes de la fibra y el epóxico utilizados, debe obtenerse una muestra de los mismos la cual consiste en 2 testigos de 12" x 12" del material compuesto debidamente curado.

Un mínimo de dos muestras del lote utilizado debe elaborarse cada día; las dos muestras deben de tomarse durante el día para asegurarse en diferentes tiempos, que la mezcla esta debidamente elaborada. Las muestras tomadas para las pruebas de laboratorio deben de se estar sometidas a una temperatura de 140° durante 48 horas antes de ser sometidas a la prueba final y luego deben de ser seleccionadas aleatoriamente por el propietario o supervisor externo para que se lleve a cabo.

Las muestras deben ser probadas según ASTM D3039, partiendo de la pieza de 12" x 12" previamente elaborada y de la cual se obtienen 5 piezas de $\frac{3}{4}$ " x 9", las cuales son enviadas para efectuar la prueba de tensión en el laboratorio; éstas deben elaborarse de acuerdo con los procedimientos ASTM, sólo las pruebas de laboratorio precalificadas deben ser utilizadas.

Pruebas y ensayos

Figura 1

ASTM D-3039 Prueba de tensión

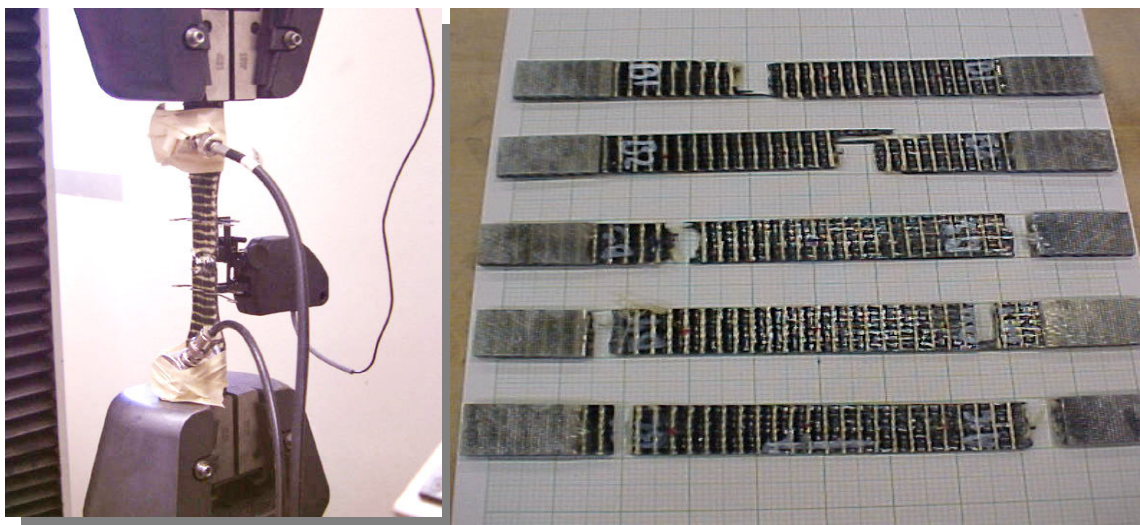


Figura 2

ASTM D-4541 Prueba de adherencia (equipo)

**Figura 3**

ASTM D-4541 Prueba de adherencia



Figura 4

ASTM D-4541 Prueba de adherencia



Las pruebas de laboratorio deben ser elaboradas dentro de las tres siguientes semanas después de que se enviaron las muestras; las pruebas deben cumplir con los valores promedio establecidos:

- Esfuerzo último de tensión
- Módulo de tensión
- Porcentaje de elongación

El 15% de todas las muestras se escogen para ser examinadas. Si una de las piezas de 12" x 12" falla y está fuera del promedio, otros especímenes de la misma muestra deben someterse a prueba. Si este último espécimen vuelve a fallar, se vuelve a tomar otra muestra y se volverá a ensayar. En un caso extremo si la nueva muestra vuelve a fallar, el resto de las muestras del mismo día se probarán y con éstas se tomarán las medidas correctivas para asegurarse que el sistema funcione correctamente.

D. Reparaciones

Todos los defectos, incluyendo burbujas, delaminaciones y desgarramiento de la fibra, que tengan más del 5% del área deben ser reparadas. Existen dos tipos de

reparaciones que se pueden realizar las cuales pueden ser:

- Defectos pequeños, en el orden 3" de diámetro, deben inyectarse o rellenarse con epóxico.
- Los defectos grandes deben repararse con los requerimientos y especificaciones del ingeniero consultor y del fabricante, y en algunos casos no aceptar los lotes de material recibido en obra.

V. PROPIEDADES DEL SISTEMA FRP

El sistema FRP tiene varios componentes los cuales al final terminan de conformar las propiedades finales de la fibra ya aplicada, las siguientes propiedades se complementan con las tablas que se presentan:

- Elevada resistencia mecánica, y un módulo de elasticidad elevado.
- Baja densidad, en comparación con otros elementos como por ejemplo el acero o el concreto.
- Resistencia a los agentes externos.
- Gran capacidad de aislamiento.
- Resistencia a las variaciones de temperatura, conservando su forma

A continuación se presentan la tabla 1, en donde se determina los diferentes tipos de fibra y sus propiedades más importantes para tomar decisiones durante el proceso de diseño.

Tabla1

System Name*	Description	Typical Test Values		Guaranteed Design Values		Composite Thickness
		Ultimate Tensile Strength, f	Tensile Modulus, E	Ultimate Tensile Strength, f ¹	Tensile Modulus, E _G	
Tyfo® SEH 51	Primary glass fiber, 0° with aramid fiber 90°	83,400 psi (575 MPa)	3.79 x 10 ⁶ psi (26.1 GPa)	66,720 psi (460 MPa)	3.03 x 10 ⁶ psi (20.9 GPa)	0.05 in. (1.3 mm)
Tyfo® SEH 51A	Primary glass fiber, 0° with glass fiber 90°	83,400 psi (575 MPa)	3.79 x 10 ⁶ psi (26.1 GPa)	66,720 psi (460 MPa)	3.03 x 10 ⁶ psi (20.9 GPa)	0.05 in. (1.3 mm)
Tyfo® SCH 41	Primary carbon fiber, 0° with glass fiber 90°	143,000 psi (986 MPa)	13.9 x 10 ⁶ psi (95.8 GPa)	121,000 psi (834 MPa)	11.9 x 10 ⁶ psi (82 GPa)	0.04 in. (1.0 mm)
Tyfo® SCH 41S	Primary carbon fiber, 0° with aramid fiber 90°	127,000 psi (876 MPa)	10.5 x 10 ⁶ psi (72.4 GPa)	107,950 psi (745 MPa)	8.9 x 10 ⁶ psi (61.5 GPa)	0.04 in. (1.0 mm)
Tyfo® WEB	Primary glass fiber, 0°/90°	44,800 psi (309 MPa)	2.80 x 10 ⁶ psi (19.3 GPa)	35,840 psi (247 MPa)	2.24 x 10 ⁶ psi (15.4 GPa)	0.01 in. (0.25 mm)
Tyfo® BC	Primary glass fiber, ±45°	40,500 psi (279 MPa)	2.70 x 10 ⁶ psi (19.0 GPa)	32,400 psi (223 MPa)	2.16 x 10 ⁶ psi (15.2 GPa)	0.034 in. (0.864 mm)
Tyfo® BCC	Primary carbon fiber, ±45°	104,000 psi (717 MPa)	10.8 x 10 ⁶ psi (74.5 GPa)	88,400 psi (609 MPa)	9.18 x 10 ⁶ psi (63.3 GPa)	0.034 in. (0.864 mm)
Tyfo® UC Strips	Unidirectional pull-formed carbon/epoxy composite	405,000 psi (2.79 GPa)	22.5 x 10 ⁶ psi (115.1 GPa)	364,500 psi (2.51 GPa)	20.3 x 10 ⁶ psi (103.6 GPa)	varies
Tyfo® UG Strips	Unidirectional pull-formed glass/epoxy composite	130,000 psi (896.3 MPa)	6.0 x 10 ⁶ psi (41.4 GPa)	117,000 psi (806.7 MPa)	5.4 x 10 ⁶ psi (37.3 GPa)	varies

Tabla 2Densidades típicas de los materiales FRP, lb/ft³ (g/cm³)

Acero	GFRP	CFRP	AFRP
490 (7.9)	75 – 130 (1.2 - 2.1)	90 – 100 (1.5 - 1.6)	75 – 90 (1.2 - 1.5)

Tabla 3

Propiedades del sistema Tyfo Fibrwrap utilizado en el proyecto Colegio Americano.

	Element completely confined using composite with main fibers aligned perpendicular to longitudinal axis or mechanically anchored	Considered Loads		
		Sustained Live Loads or Live Loads \geq 100 psf	Intermittent Live Loads ($<$ 100 psf)	Temporary Loads (Earthquake or Wind)
Flexural Enhancement	Yes	0.002	0.004	0.006
	No	0.002	0.004	0.004
Shear Enhancement	Yes, or FibrAnchors [®] used	0.004	0.004	0.004
	No	0.0015	0.0015	0.0015
Axial Load Enhancement	Yes	0.002	0.004	0.006
	No	-	-	-
Lap Splice Enhancement	Yes (Circular columns)	0.0015	0.0015	0.0015
	No	-	-	-
Ductility Enhancement	Yes	N/A	N/A	As Calculated
	No	-	-	-

Figura 5

Propiedades de las láminas de fibra seca.

	E-modulus (GPa)	Ultimate Strain (%)	UTS (MPa)
CFRP (laminata)	165 - 215	1.3 – 1.4	2500 - 3000
CFRP (sheet)	240 - 640	0.4 – 1.6	2650 - 3800
GFRP (sheet)	65 - 75	4.3 – 4.5	2400
AFRP (sheet)	120	2.5	2900

Figura 6

Diferentes tipos de FRP con sus diferentes aplicaciones.

Element	Application	Glass Fibre Sheet (GFS)	Carbon Fibre Sheet (CFS)	Carbon Fibre Laminate (CFL)
	<i>Fibre Direction</i>	Uni-directional	Uni-directional	Uni-directional
	<i>Fibre arrangement</i>	Woven	Straight	Straight
Columns	Confinement	☼☼	☼☼	NA
	Flexure	☼	☼	☼☼☼☼
	Axial Load	☼☼	☼	☼☼☼☼
	Ductility	☼☼	NA	NA
	Durability	☼☼	☼	NA
Beams	Flexure	NA	☼	☼☼
	Shear	NA	☼☼	NA
Walls	Shear & flexure	☼☼	☼	☼
Slabs	Flexure	NA	☼	☼☼
Durability	Spalling	☼☼	☼	NA

- ☼ Uso posible
 ☼☼ Uso preferible
 ☼☼☼☼ Aplicación especial

Figura 7

Aplicaciones del sistema FRP dependiendo de la dirección de la fibra y su uso.

Composite Type	Fibre direction	Fibre arrangement	Typical application
Carbon Fibre Sheet (CFS)	Uni-directional	Straight	Increase in flexural and shear capacity; confinement
Aramid Fibre Sheet (AFS)	Uni-directional	Straight	Special applications
Glass Fibre Sheet (GFS)	Bi-directional	Woven	Increase in confinement and ductility
Carbon Fibre Laminate (CFL)	Uni-directional	Straight (partially pre-tensioned)	Increase in flexural capacity

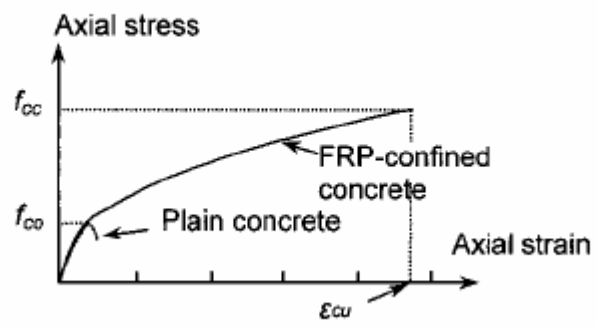
Figura 8

Esfuerzos mínimos de tensión

Product	Minimum Tensile Strength (MPa)
Carbon Fibre Sheet (CFS)	> 1.0
Aramid Fibre Sheet (AFS)	> 1.0
Glass Fibre Sheet (GFS)	> 0.2
Carbon Fibre Laminate (CFL)	> 1.5

Figura 9

Comparación de esfuerzos entre una sección de concreto reforzada versus una sección confinada con FRP



VI. APLICACIONES

Actualmente ya se tiene una gran cantidad de aplicaciones del sistema FRP, en diferentes partes del mundo y en gran cantidad de estructuras de diferente tipo y características.

El sistema ya está siendo usado ampliamente y su uso está sustentado en una extensa investigación, y la experiencia real de aplicaciones a estructuras que están sujetas a cargas estáticas o dinámicas, pero se tiene poca experiencia en estructuras ya reforzadas con fibra para mejorar el comportamiento durante un evento sísmico.

Estas son algunas aplicaciones en donde se puede utilizar el sistema:

- Puentes
- Edificios, mampostería, marcos de concreto y acero
- Parqueos
- Tanques de agua
- Silos
- Muros de contención
- Torres
- Losas

A. Estructuras existentes sin daño

Este tipo de estructuras son aquellas que no tienen daño aparente, ya han pasado varios eventos sísmicos de poca magnitud y han tenido ya una vida útil extensa, y sus propietarios o nuevos inversionistas necesitan estar seguros que la misma tenga la capacidad necesaria por un nuevo uso o no sufra daño severo en el momento de un sismo o simplemente se le quiere dar a la estructura una capacidad adicional.

Estas estructuras deben ser evaluadas por un ingeniero estructural con suficiente experiencia y el criterio necesario para la aplicación del sistema, ya que debe tener claro el porqué usar esta forma de reforzamiento, normalmente estas estructuras son antiguas diseñadas con códigos anteriores en los cuales no se utilizaban los criterios de ductilidad, por lo que seguramente tendrán un pobre

refuerzo de confinamiento y el sistema estructural no estaría bien conformado y probablemente se deberán de utilizar un sistema combinado de FRP y otros elementos estructurales adicionales.

Ejemplos de estas aplicaciones, son puentes antiguos que no tienen daño, pero que están diseñadas para cargas vivas antiguas y están sujetos a nuevas cargas vivas y es necesario incrementar su capacidad de flexión o cortante, esto se puede siempre y cuando la sección no tenga problemas de inercia y pueda tener un problema de deformaciones excesivas o se pueda tener vibraciones fuera de lo usual; otra aplicación podría ser un edificio antiguo bien configurado, pero con necesidad de incrementar la carga viva y proveerle ductilidad a través de la fibra confinando sus elementos estructurales.

Es preciso indicar que se debe analizar por completo la estructura ya que la fibra casi siempre va acompañada de otro tipo de refuerzo, por ejemplo refuerzo para limitar deformación o calzado de cimentaciones.

B. Estructuras dañadas

Aunque el reforzamiento debe ser preventivo no siempre se da el caso, y en la mayoría de ocasiones se efectúa un reforzamiento por daño derivado de aplicación de cargas excesivas, cambio de uso de la estructura o porque la misma ha sido sometida a esfuerzos inducidos por un eventos sísmico.

Como se dijo con anterioridad la aplicación de la fibra siempre va acompañada con otro tipo de refuerzo, ya que la misma no puede solucionar todos los problemas que se pueden presentar, por ejemplo es necesario reforzar los nudos, puede darse el caso de tener problemas de forma de los diferentes elementos de la estructura o el sistema estructural completo necesita ser re-estructurado, o los cimientos no tienen la capacidad suficiente para soportar la nueva carga axial de la columna aunque la misma ya este reforzada con FRP, por ello siempre es necesaria la intervención del ingeniero estructural ya que la fibra sólo forma parte de un proceso de rehabilitación.

Este tipo de estructuras tienen problemas que usualmente se refleja en su comportamiento y la mayoría de las veces deben ser reforzadas las columnas para mejorar su capacidad de carga axial y principalmente restituir confinamiento, así

como el problema de cortante en vigas; debe tenerse especial cuidado en aquellos miembros que han tenido una degradación severa del concreto, en cuyo caso deberá de restituirse todo el concreto dañado y luego dársele otras capacidades como ductilidad o confinamiento.

Debe tenerse claro que aunque la fibra de carbono mejora la ductilidad, no limita las deformaciones, si ese fuera el caso ya que no hay incremento sustancial de rigidez.

En aquellas estructuras en que se ha tenido daño en sola una parte del número de elementos debe proveerse un refuerzo simétrico con FRP para que la estructura mejore su comportamiento general.

En las estructuras dañadas es necesario elaborar un estudio muy completo de la misma y de cada uno de los elementos y puede darse el caso de no se pueda aplicar el sistema.

C. Estructuras especiales

Este tipo de estructuras, en el caso en que tenga que utilizarse fibra son aquellos en los cuales es complicada la aplicación, por ejemplo estructuras cuyos elementos tienen formas diversas como secciones en forma de “L” o “T”, o en varios lados, como por ejemplo una columna con bifurcaciones, estos elementos deben tratarse con especial cuidado debido a que la fibra por sí sola no puede confinar el elemento, en cuyo caso es necesario reconformar el elemento o utilizar conectores o postensión externa para que ambos sistemas estén trabajando conjuntamente y se logre el objetivo esperado.

El reforzamiento de los nudos es extremadamente complicado ya que no existe un sistema que sólo con fibra logre resolver el problema, por lo que algunos especialistas han utilizado barras conectoras o aditamentos de acero para mejorar el detallado final.

Otro tipo de estructura especial es aquella que está expuesta a la intemperie o a algún agente externo agresivo en cuyo caso deberá de tomarse medidas adicionales para proteger el sistema.

Por último, se encuentran estructuras con un alto grado de dificultad en su aplicación como puede ser el confinamiento de dos columnas separadas entre sí por una junta demasiado escasa o elementos ubicados fuera del alcance en cuyo caso debe utilizarse andamiajes de gran altura, grúas o maquinaria especial. Este es un problema serio de instalación y de supervisión ya que el procedimiento de instalación debe cumplirse a cabalidad y debe llenar los requisitos del control de calidad.

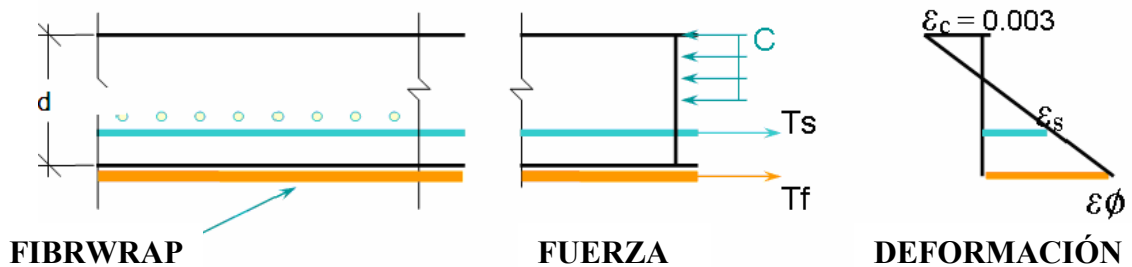
VII. TIPOS DE REFORZAMIENTO

A. Refuerzo a flexión

Uno de los usos más frecuente de la fibra es el refuerzo a flexión, este tipo de refuerzo se puede calcular en base a la teoría de flexión de resistencia de materiales incluyendo en las ecuaciones de equilibrio una fuerza adicional denominada T_f que entra a trabajar en el momento en que el elemento se somete a esfuerzo de flexión, a continuación se presenta la teoría básica de este refuerzo para losas y vigas.

Reforzamiento para incrementar la capacidad a flexión en losas y vigas

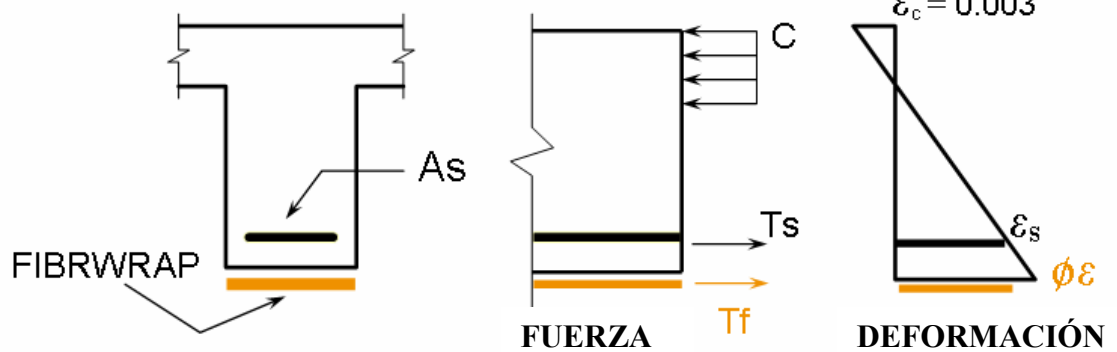
-Losas



SECCIÓN REFORZADA CON FIBRWRAP

INCREMENTA LA CAPACIDAD A FLEXIÓN HASTA UN 100%

Vigas

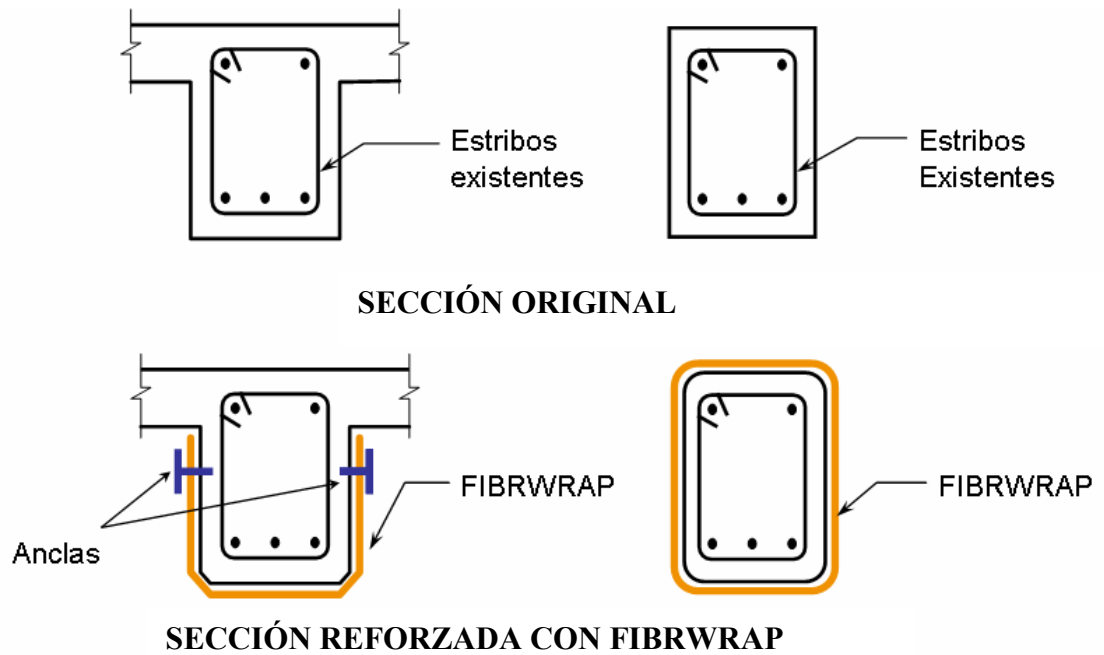


SECCIÓN REFORZADA CON FIBRWRAP

INCREMENTO EN LA CAPACIDAD A MOMENTO 300%

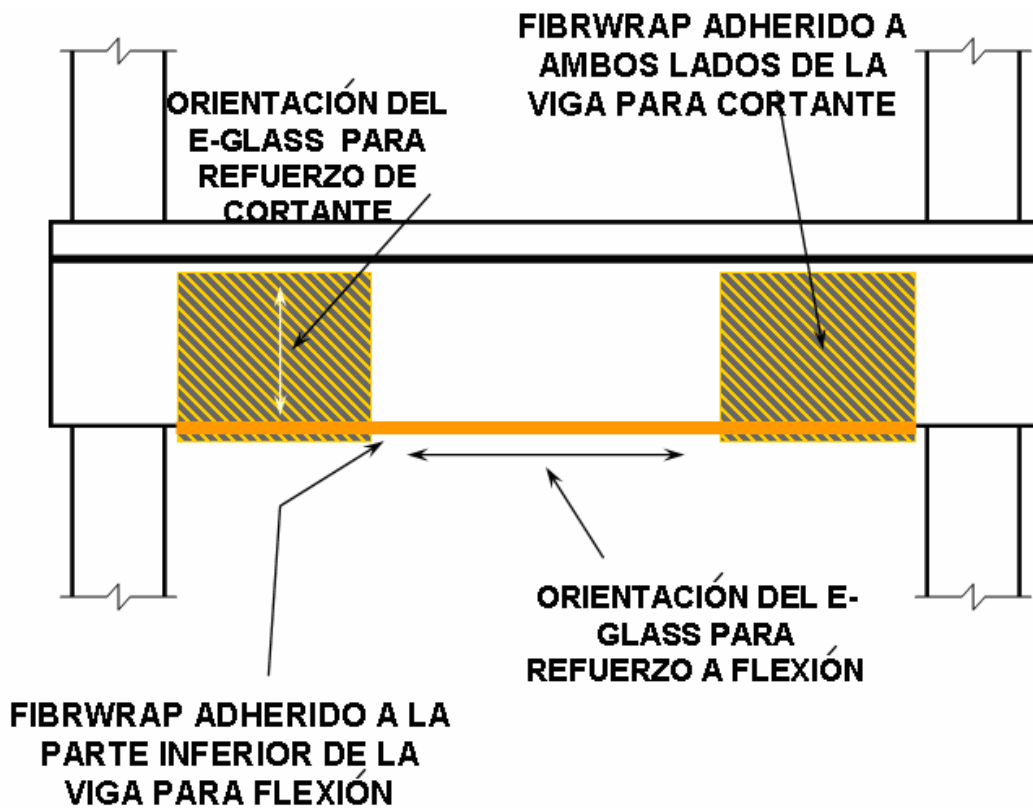
B. Refuerzo a corte

Otro uso muy frecuente es el refuerzo a corte de la fibra, éste se da continuamente en estructuras o cambio de uso de la estructura, la misma se utiliza en los extremos de las vigas en forma de “U” en cuyo caso es necesario el uso de anclas ya que no se puede abrazar por completo el elemento, si es importante el sentido de la fibra de vidrio para que la misma desarrolle los esfuerzos esperados véase el esquema más adelante.



INCREMENTA LA CAPACIDAD A CORTANTE HASTA UN 150%

1. Esquema de aplicación en una viga reforzada a flexión y corte



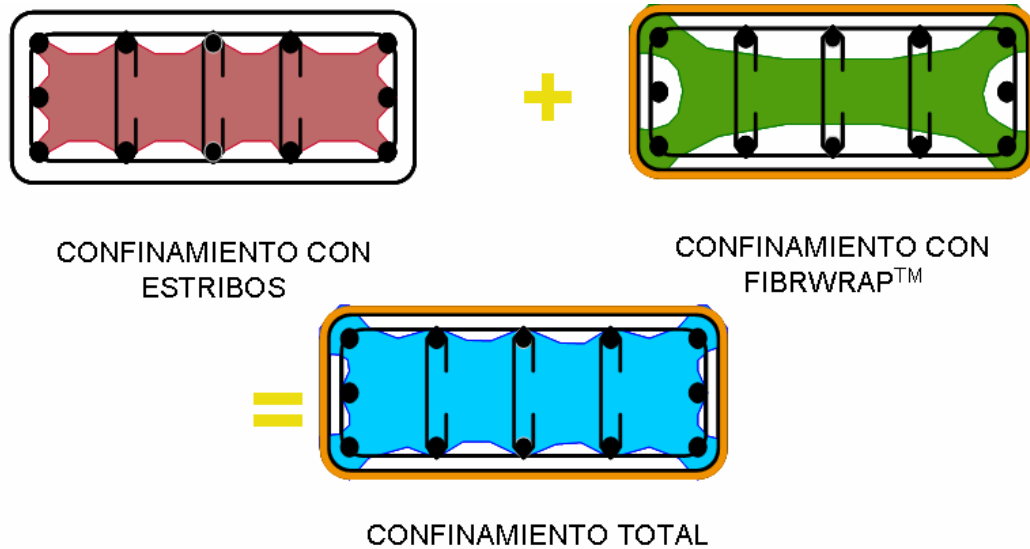
C. Refuerzo a carga axial

Este incremento de capacidad se debe a que usualmente calculamos la carga axial tomando en cuenta la sección neta de la columna, es decir el área que está comprendida dentro de los estribos o confinada y el resto básicamente es recubrimiento, debido a que la fibra envuelve todo el elemento, le provee una capacidad extra, ya que este recubrimiento queda confinado, pasando éste a formar parte del núcleo y aunque se desprece nuevamente una parte, el área confinada aumenta y esto le permite tener mayor área efectiva en el momento de tomar carga axial, véase a continuación los esquemas estructurales, en los diagramas se puede observar que la forma del elemento incide en el comportamiento.



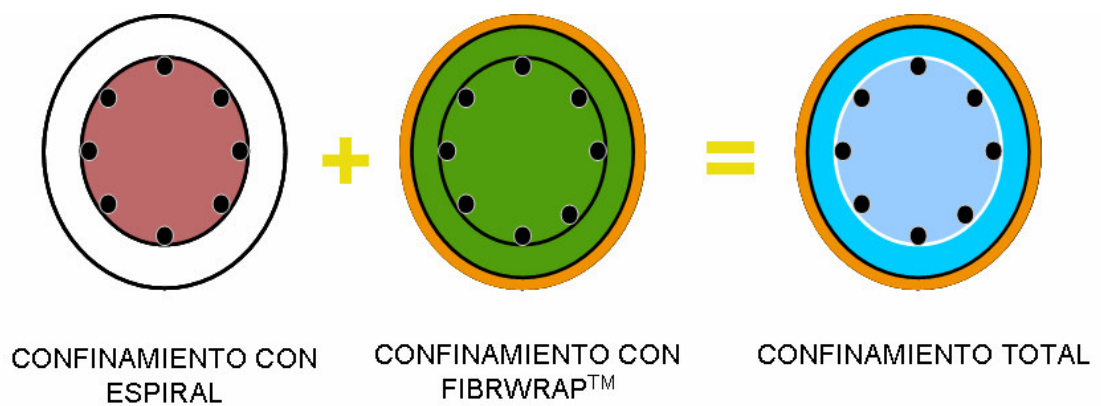
**INCREMENTO EN CAPACIDAD A CARGA AXIAL HASTA UN 50%
DEBIDO AL CONFINAMIENTO.**

1. Incremento en columnas rectangulares



INCREMENTO EN CAPACIDAD DE CARGA AXIAL HASTA UN 30%

2. Reforzamiento en columnas circulares



**INCREMENTO EN CAPACIDAD A CARGA AXIAL HASTA UN 100%
DEBIDO AL CONFINAMIENTO**

D. Incremento de ductilidad

De acuerdo con la teoría de los últimos años el detallado del refuerzo es sumamente importante para el comportamiento del concreto reforzado en el momento de un evento sísmico, no es simplemente colocar el refuerzo, si no también como se coloca, en este sentido el confinamiento del concreto es vital en una estructura de concreto ya que es la que le provee ductilidad, es decir la capacidad de deformación, de no tenerse este atributo es necesario proveérselo a la estructura reforzándolo con fibra de vidrio, en forma de envoltura (wrap), lo que confina la columna por completo, proveyéndole la ductilidad necesaria, este tipo de refuerzo puede calcularse de acuerdo al tipo de estructura que se está trabajando y a su comportamiento esperado, un ejemplo de este cálculo se ilustra en la aplicación específica del Colegio Americano de Guatemala.

E. Corrección de errores de diseño o construcción

Este tipo de reforzamiento envuelve cualquiera de los expuestos con anterioridad y se da luego de tener construida la estructura, concluida una etapa o por errores u omisiones de diseño los cuales ponen en riesgo el comportamiento de la estructura y puede contemplar el restituir ó incrementar la capacidad de carga de uno o todos los elementos de la estructura de que se trata.

VIII. PLANEACIÓN Y DISEÑO

A. Proceso de diseño

Obviamente el proceso de diseño de este tipo de reforzamiento debe ser desarrollado para una estructura existente y de la cual se puede obtener cierto tipo de información, por ejemplo el sitio en donde está ubicado, lo que nos permite ver como fue diseñado, el año en que fue diseñado y construido es importante ya que refleja también su cuidado al construirla, su mantenimiento, el uso también es importante ya que al diseñar el reforzamiento ya sabemos el uso inmediato que tendrá la nueva estructura; debido a toda esta cantidad de información es necesario pensar en un proceso de diseño, el cual plantearemos a continuación:

Etapa 1: Investigación de la estructura

- Ubicación
- Época de diseño y construcción
- Códigos utilizados
- Uso actual y uso futuro
- Planos estructurales
- Inspección estructural
- Ensayos no destructivos

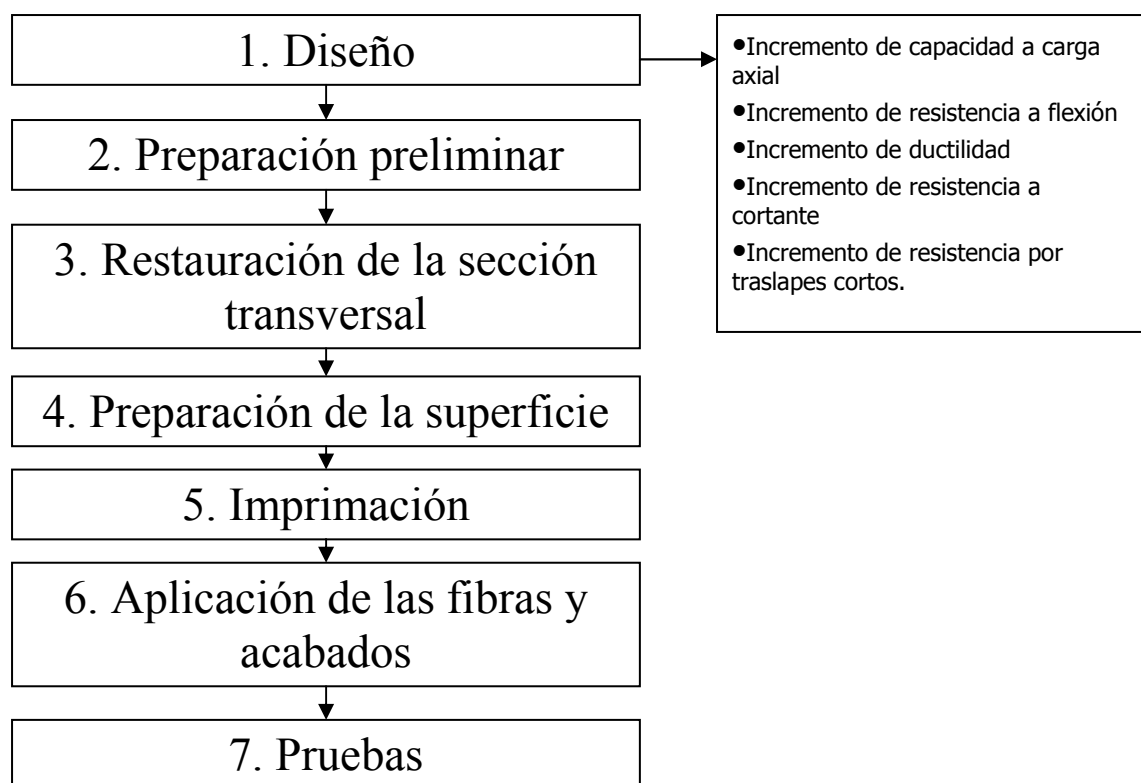
Etapa 2:

- Análisis estructural
- Diseño estructural
- Desarrollo de planos estructurales

Siguiendo sistemáticamente estos pasos podemos desarrollar el diseño de una estructura y obtener los resultados esperados en esta fase; sí es importante indicar que este tipo de diseño es muy especializado por lo que debe ser elaborado por un ingeniero estructural con mucha experiencia en diseño, construcción y reparación.

B. Diagrama de flujo de diseño y construcción del sistema FRP

Posteriormente a la etapa de diseño debe de implementarse en obra un proceso detallado de como debemos de llevar a cabo el reforzamiento o reparación de la estructura existente, para llevar a cabo esta etapa eficientemente, idealmente debe contarse con elemento humano especializado, evitando así errores en la utilización del sistema, si se ha cumplido totalmente con la etapa de diseño se puede resumir en un diagrama de flujo las etapas generales del proceso constructivo.



C. Detallado de diseño

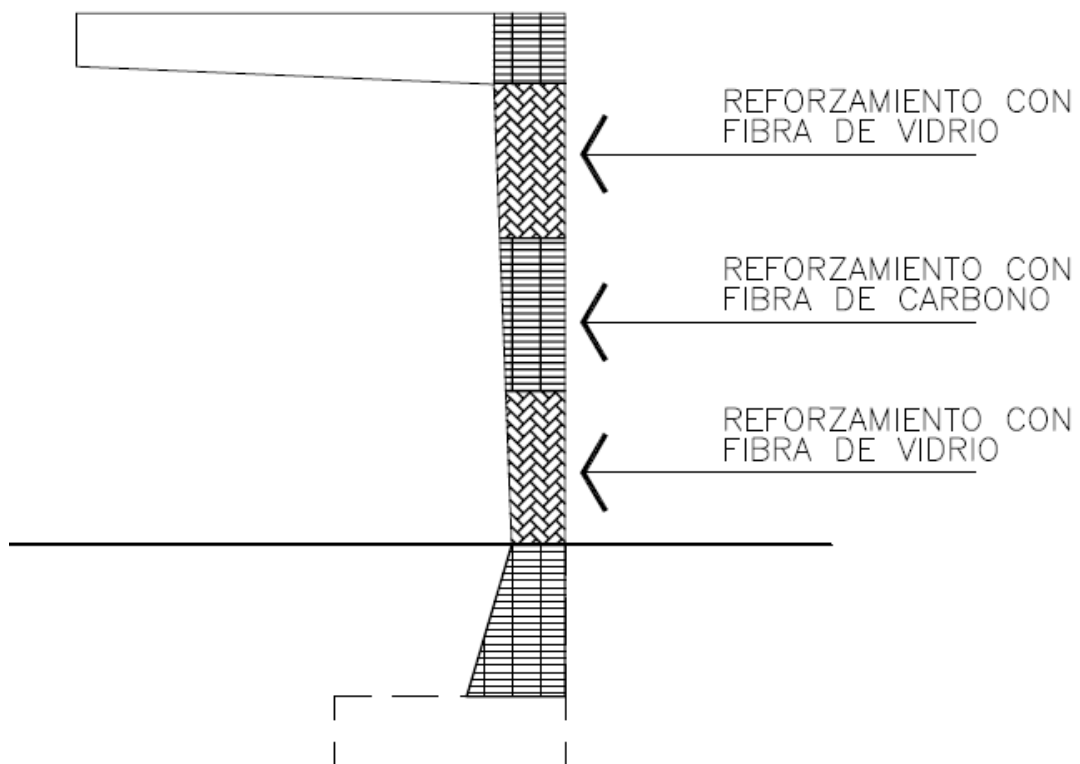
Lo más importante del diseño es saber cómo transmitir todas las ideas del diseñador al usuario que, finalmente en este caso, es el constructor. Toda esta información es trasladada en forma gráfica, la cual no sólo debe ser clara, si no también tener completa la información, se debe ser preciso en indicar todas las medidas, pero también el alcance, el diseñador debe pensar como el constructor, visualiza digiere la información en el momento de plasmar los detalles constructivos en el plano final.

No tiene sentido diseñar muy bien, pero no poder traducirle al usuario lo que se tiene pensado implementar en el campo, probablemente esta es la parte mas importante en esta etapa del diseño.

A continuación se presentan ejemplos del sistema de reforzamiento con el sistema FRP.

Figura 10

Sección de columna reforzada del Colegio Americano de Guatemala



D. Diseño de secuencia constructiva

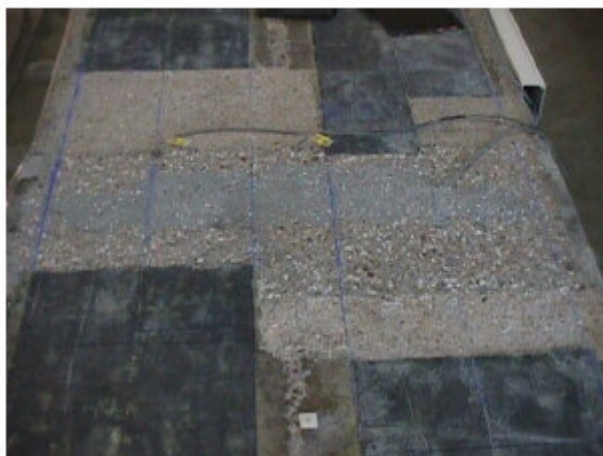
Es muy importante diseñar el proceso de la secuencia constructiva, la cual debe de especificarse muy claramente en los planos de construcción finales, ya que es lo que el constructor consultará en obra, para ello el diseñador debe ser muy explícito en el proceso constructivo, a continuación se presenta toda la secuencia constructiva del uso de la fibra; este documento puede formar parte del pliego de especificación del proyecto.

1. Secuencia:

- a. Primero la superficie de concreto deberá estar libre de cualquier impureza (agua, grasas, etc.) o partícula (residuos de concreto, áridos, trozos de metal, etc.), por lo que se deberá limpiar cuidadosamente.

Figura 11

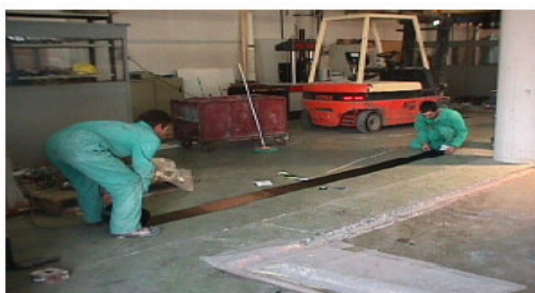
Limpieza de la superficie de concreto



- b. Seguidamente se debe quitar la lechada superficial de concreto haciendo para ello escarificado de aproximadamente 2 mm, pudiéndose hacer también manualmente con cincel y martillo; así como también por Sand-Blast (chorro de arena), o cualquier técnica similar. Se procede entonces a liberar de polvo y partículas sueltas la superficie valiéndose para ello de una pistola de aire con compresor y también de un cepillo para quitar todas las partículas sueltas de la zona. Trazando sobre la superficie la posición del tejido de fibras de carbono.

Figura 12

Preparación de las bandas de FRP



- c. En este momento se preparan las bandas de FRP cortándolas con tijeras y teniendo el cuidado de pegar en la zona de corte una banda adhesiva para evitar que se deforme el final de la banda.

- d. Después de la preparación de las bandas, se procede a preparar la resina epóxica que es una resina bi-componente y predosificada por el fabricante, la cual está compuesta por una base y un endurecedor para luego verter dicha mezcla en un recipiente especial, con una mezcladora mecánica helicoidal durante 2 minutos aproximadamente hasta obtener una mezcla uniforme.

Figura 13

Preparación de la resina



- e. Se da inicio a la colocación de las bandas distribuyendo la resina epoxi sobre la superficie de concreto, utilizando para ello un rodillo con poco tejido; procurando dejar una capa abundante de resina. A razón de $700 \text{ gr/m}^2 \pm 50 \text{ gr}$. de material. El objetivo es llenar todas las imperfecciones del soporte y permitir una buena adherencia entre el concreto y el tejido de fibra de carbono.

Figura 14

Aplicación de la resina sobre la superficie de concreto



- f. Posteriormente se procede a colocar el tejido de fibra de carbono debidamente alineado, presionándolo contra el concreto con otro rodillo, el cual deberá estar convenientemente nivelado para ejercer una presión constante y evitar que queden partículas de materiales extraños. Se debe tener cuidado de la posición en que se colocan ya que este tejido presenta diversas configuraciones en ambos lados del tejido, por lo que deberá quedar el lado que presenta el tejido en sentido longitudinal a la banda; lo que permitirá luego aplicar la siguiente capa de resina epóxica. Esta operación se hace desde un extremo de la banda hasta el otro. Vigilando el paralelismo entre los bordes durante la fijación de la banda.

Figura 15

Colocación de la primera banda de FRP



- g. Inmediatamente después que está pegada la banda sobre la primera capa de resina epóxica, se procede a colocar una segunda capa de resina la cual se puede inicialmente aplicar con el mismo rodillo mencionado anteriormente, en cantidades de $700 \text{ gr/m}^2 \pm 50 \text{ gr.}$ de material; para seguidamente utilizar una espátula metálica para hacer que todo el tejido de fibra de carbono quede debidamente impregnado en ambos lados. Es importante al aplicar la resina en esta segunda capa, asegurarse que toda la resina es absorbida por el tejido. Esto fácilmente apreciable ya que en el tejido se puede distinguir las cantidades de resina que absorbe. Observando que cuando existan traslapes, éstos deberán ser de un mínimo de 20 cm.

Figura 16

Aplicación de la segunda capa de resina con rodillo

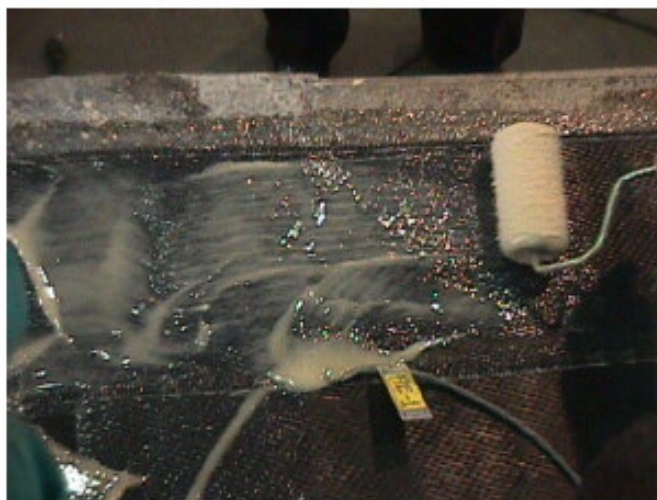


Figura 17

Aplicación de la segunda capa de resina con espátula



Figura 18

Colocación de la segunda banda de FRP



IX. APLICACIÓN ESPECÍFICA

El objetivo principal de este trabajo es presentar el uso correcto de este tipo de reforzamiento, a una estructura real para este caso se escogió el proyecto del reforzamiento del Colegio Americano de Guatemala, edificación que fue analizada correctamente en su momento como debe hacerse, es decir tomando medidas preventivas en una estructura importante que no tiene daño.

La estructura fue estudiada y analizada determinándose que era conveniente mejorar el confinamiento de las columnas para proveerle mayor ductilidad a la misma, y de esta manera mejorar su comportamiento en el momento de un evento sísmico.

Esta es la forma más eficiente de utilizar el sistema FRP ya que es preventivo y en la estructura sin daño, y es también la forma más económica ya que la estructura esta intacta y sin ningún problema.

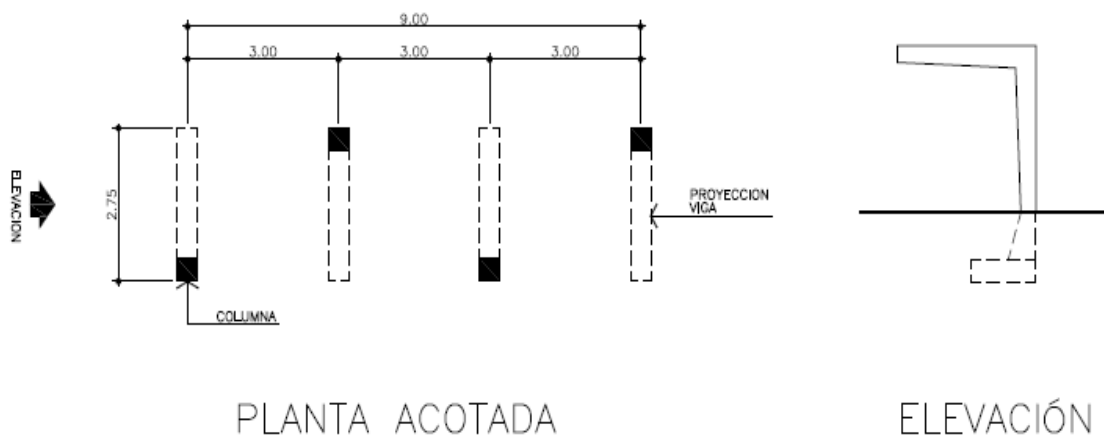
A. Planificación de ejecución

El reforzamiento del Colegio Americano de Guatemala fue debidamente planificado, ya que luego de determinar que la estructura tenía cierto grado de vulnerabilidad, se diseñó el sistema de reforzamiento en los diferentes edificios, ejecutándose este trabajo en forma continua en los diferentes cuerpos del campus, para nuestro caso se analizó específicamente el pasillo principal; estructura que está compuesta por un elemento en forma de “L” alterno, (viga columnas) tal y como se muestra en el plano esquemático.

Ésta es una estructura muy particular ya que es un conjunto de voladizos alternos, en otras palabras se tiene muy poca redundancia o casi nula, lo que la hace más vulnerable, ya que bastaría una sola articulación plástica y la misma tendría un colapso inmediato.

Figura 19

Planta y elevación de las columnas del Colegio Americano de Guatemala



En este caso si desea dejarse o mantenerse la arquitectura, que es muy valiosa, en este caso, sólo queda mejorar su comportamiento inelástico, es decir reforzando al elemento principal (la columna), para proporcionarle mayor capacidad de deformación; para ello se planeó reforzar con el sistema FRP únicamente la columna.

Debido a que acá no es necesario tomar otro tipo de medidas se pudieron trabajar varios elementos paralelamente, limitando el área de trabajo a tramos continuos, limitados únicamente por el personal de trabajo.

Luego de determinar que era necesario proveerle confinamiento a la estructura se procedió a diseñar el confinamiento con fibra, este se hizo pensando en utilizar dos tipos de factores de demanda inelástica (R), el primer escenario se elaboró con un $R=4$ de lo cual se obtuvo que era necesario aplicar 2 capas de fibra y luego se hizo el ejercicio con un $R=6$ en donde se obtuvieron 3 capas de fibra.

El cálculo de este reforzamiento se adjunta a continuación, para ejemplificar el método de diseño.

Primer escenario R=4

1. Datos del proyecto

Nombre: Colegio Americano de Guatemala

Fecha: Mayo 2,006

Meta de diseño: Incrementar la ductilidad de las columnas a los niveles requeridos por el reglamento vigente

2. Estimación de la ductilidad de desplazamiento ($\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$)

“coeficiente sísmico (espectro elástico)”

Zona sísmica: $A_o := 0.40$

Factor de importancia: $I := 1.2$

Coefficiente de sitio: $C_o := 3.0$

Factor de modificación de respuesta: $R_w := 4$

Carga estática: $C_s := \frac{A_o I C_o}{R_w} \quad C_s := 0.36$

Relación de la carga de inercia de respuesta elástica a la carga de diseño estático

$$R := C_s \quad R := 0.36$$

$$\mu := \frac{1}{R} \quad \mu := 2.778$$

3. Datos de la columna existente

Carga axial $P_u := 10.05 \text{ ton}$

Resistencia a compresión del concreto	$f'_c := 210 \frac{kg}{cm^2}$
Límite de fluencia del acero:	$f_y := 2800 \frac{kg}{cm^2}$
Ancho de la columna	$b := 25cm$
Largo de la columna	$h := 45cm$
Altura de la columna	$L := 300cm$
Longitud efectiva:	$L_e := 1L$ (curvatura simple)
Diámetro de la barra longitudinal	$d_b := 1.91cm$

4. Resultados del análisis momento curvatura

$$M_u := 12ton - m$$

$$c := 12.25cm$$

$$\phi_y := 0.00047$$

5. Propiedades de los materiales compuestos:

$$FRP := SEH - 51A$$

Tipo= "SEH-51"

Resistencia última a la tensión:

$$f_j := 4.69 \times 10^3 \frac{kg}{cm^2}$$

Módulo de elasticidad:

$$E_j := 2.13 \times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$$

Espesor por capa:

$$t_j := 0.13cm$$

Deformación permisible a cortante en la fibra:

$$\varepsilon_j := 0.022$$

Ángulo de orientación de la fibra primaria: $\theta := 90 \text{ deg}$

6. Diseño de la fibra requerida:

Longitud de la rótula plástica (Lp)

$$L_p = 0.08L_e + 0.15(fy d_b) \left(0.01429 \frac{cm^2}{kg} \right)$$

$$L_p = 35.463cm$$

Curvatura de ductilidad requerida

$$\mu_\phi := 1 + \frac{\mu - 1}{3 \frac{L_p}{L_e} \left(1 - \frac{0.5L_p}{L_e} \right)}$$

$$\mu_\phi := 6.328$$

Entonces, la curvatura última es:

$$\phi_\mu := \mu_\phi \phi_y$$

$$\phi_\mu = 2.974 \times 10^{-3}$$

Y la deformación última confinada del concreto para alcanzar la curvatura última es:

$$\varepsilon_{cu} := \phi_\mu \frac{c}{2.54cm}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.014$$

La relación volumétrica de confinamiento por fibra es:

$$f_{cc} = 1.5 f_c$$

$$f_c = \frac{f_{cc}}{70 \frac{kg}{cm^2}}$$

$$f_c = 4.5ksi$$

$$P_{sj} = \frac{0.80(\varepsilon_{cu} - 0.004)f_{cc}}{\left(\frac{f_j}{70 \frac{kg}{cm^2}} \right) \varepsilon_j}$$

$$P_{sj} = 0.025$$

El espesor requerido para lograr este confinamiento es:

$$t = \frac{P_{sj}^{bh}}{2(b+h)}$$

$$t = 0.203cm$$

No. de capas

$$N_f = \frac{t}{t_j} N_f = 1.562 \quad \text{Utilizar dos capas}$$

Segundo escenario R=6

1. Datos del Proyecto

Nombre: Colegio Americano de Guatemala

Fecha: Mayo 2,006

Meta de diseño: Incrementar la ductilidad de las columnas a los niveles requeridos por el reglamento vigente

2. Estimación de la ductilidad de desplazamiento ($\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$)

“Coeficiente sísmico (espectro elástico)”

Zona sísmica: $A_o := 0.40$

Factor de importancia: $I := 1.2$

Coefficiente de sitio: $C_o := 3.0$

Factor de modificación de respuesta: $R_w := 6$

Carga estática: $C_s := \frac{A_o I C_o}{R_w} \quad C_s := 0.24$

Relación de la carga de inercia de respuesta elástica a la carga de diseño estático

$$R := C_s \quad R := 0.24$$

$$\mu := \frac{1}{R} \quad \mu := 4.167$$

3. Datos de la columna existente

Carga axial $P_u := 10.05 \text{ ton}$

Resistencia a compresión del concreto $f'_c := 210 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Límite de fluencia del acero: $f_y := 2800 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

Ancho de la columna $b := 25 \text{ cm}$

Largo de la columna $h := 45 \text{ cm}$

Altura de la columna $L := 300 \text{ cm}$

Longitud efectiva: $L_e := 1L$ (curvatura simple)

Diámetro de la barra longitudinal $d_b := 1.91 \text{ cm}$

4. Resultados del análisis momento curvatura

$$M_u := 12 \text{ ton} - \text{m}$$

$$c := 12.25 \text{ cm}$$

$$\phi_y := 0.00047$$

5. Propiedades de los materiales compuestos:

$FRP := SEH - 51A$

Tipo= "SEH-51"

Resistencia última a la tensión:

$$f_j := 4.69 \times 10^3 \frac{kg}{cm^2}$$

Módulo de elasticidad:

$$E_j := 2.13 \times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$$

Espesor por capa:

$$t_j := 0.13cm$$

Deformación permisible a cortante en la fibra: $\varepsilon_j := 0.022$

Ángulo de orientación de la fibra primaria: $\theta := 90deg$

6. Diseño de la fibra requerida:

Longitud de la rótula plástica (Lp)

$$L_p = 0.08L_e + 0.15(f_y d_b) \left(0.01429 \frac{cm^2}{kg} \right)$$

$$L_p = 35.463cm$$

Curvatura de ductilidad requerida

$$\mu_\phi := 1 + \frac{\mu - 1}{3 \frac{L_p}{L_e} \left(1 - \frac{0.5L_p}{L_e} \right)}$$

$$\mu_\phi := 10.49$$

Entonces, la curvatura última es:

$$\phi_{\mu} := \mu_{\phi} \phi_y$$

$$\phi_{\mu} = 4.93 \times 10^{-3}$$

Y la deformación última confinada del concreto para alcanzar la curvatura última es:

$$\varepsilon_{cu} := \phi_{\mu} \frac{c}{2.54 \text{ cm}}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.024$$

La relación volumétrica de confinamiento por fibra es:

$$f_{cc} = 1.5 f_c$$

$$f_{cc} = \frac{f_{cc}}{70 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}$$

$$f_{cc} = 4.5 \text{ ksi}$$

$$P_{sj} = \frac{0.80(\varepsilon_{cu} - 0.004)f_{cc}}{\left(\frac{f_j}{70 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) \varepsilon_j}$$

$$P_{sj} = 0.048$$

El espesor requerido para lograr este confinamiento es:

$$t = \frac{P_{sj}^{bh}}{2(b+h)}$$

$$t = 0.388 \text{ cm}$$

No. de capas

$$N_f = \frac{t}{t_j}$$

$$N_f = 2.986 \quad \text{Utilizar tres capas}$$

Luego de diseñar, se tomó la decisión que era necesario proveer únicamente 2 capas de FRP y se desarrollarán los esquemas de construcción.

B. Preparación de la superficie

Ya en campo se procedió primero que nada a demoler la banqueta de concreto ubicado únicamente sobre la zapata, posteriormente se extrajo el relleno estructural y se dejó la superficie expuesta de la columna en toda su longitud desde la parte superior de la zapata hasta la parte superior de la viga; luego se escarificó la columna y se macilló para obtener una superficie lisa.

C. Aplicación final

Luego de preparar la superficie se inició la aplicación final iniciando por aplicar una mano de la resina epóxica, continuando con colocar el lienzo de fibra de carbono para mejorar las áreas a tensión de la columna, durante este proceso se llevó la bitácora diaria de control y la obtención de los lienzos de 12"x12" para obtener las tiras que serán sometidas a su prueba de tensión.

Una vez colocada la fibra de carbono se preparó la columna para aplicar una segunda capa de fibra de vidrio, siguiendo el mismo procedimiento, aplicando la resina epóxica y luego la fibra de vidrio saturada en dos capas en posición horizontal a una longitud de $L/3$ en cada extremo de la columna.

Luego de estar terminadas todas las aplicaciones de fibra se deja secar, obteniéndose una superficie rugosa, ideal para aplicar un acabado final de cualquier tipo, en este caso se usó un acabado liso como el original, por último se puede aplicar el color deseado.

A continuación se presentan una serie de fotografías que se tomaron en el lugar del reforzamiento y que ilustran claramente el procedimiento descrito con anterioridad.

D. Secuencia gráfica

Figura 20

Estructura original del Colegio Americano de Guatemala



Figura 21

Remoción de capa vegetal

**Figura 22**

Excavación sobre la zapata



Figura 23

Excavación sobre la zapata

**Figura 24**

Preparación final de la columna



Figura 25

Estructura original del Colegio Americano de Guatemala

**Figura 26**

Escarificación de las columnas



Figura 27

Escarificación de las columnas



Figura 28

Aplicación de la macilla para dejar la superficie lisa

**Figura 29**

Aplicación de la primera capa de resina epóxica



Figura 30

Preparación de la resina epóxica

**Figura 31**

Mezcladora helicoidal



Figura 32

Preparación del área de trabajo

**Figura 33**

Mezclando la resina con la mezcladora helicoidal



Figura 34

Mezclando la resina con la mezcladora helicoidal

**Figura 35**

Aplicación de la resina epóxica sobre las columnas



Figura 36

Aplicación de la resina epóxica sobre las columnas

**Figura 37**

Aplicación de la resina epóxica sobre las columnas



Figura 38

Vista de la resina epóxica sobre la columna

**Figura 39**

Preparación de las bandas de FRP



Figura 40

Preparación de las bandas de FRP

**Figura 41**

Preparación de las bandas de FRP



Figura 42

Aplicación de la resina epóxica sobre las bandas FRP

**Figura 43**

Colocación de la primera capa de FRP sobre la columna



Figura 44

Colocación de la primera capa de FRP sobre la columna

**Figura 45**

Colocación de la primera capa de FRP sobre la columna



Figura 46

Aplicación de la resina epóxica sobre las bandas de fibra de vidrio

**Figura 47**

Colocación de la primera capa de fibra de vidrio sobre la columna



Figura 48

Colocación de la primera capa de fibra de vidrio sobre la columna

**Figura 49**

Colocación de la primera capa de fibra de vidrio sobre la columna



Figura 50

Aplicación de la segunda capa de resina epóxica sobre las bandas de fibra de vidrio

**Figura 51**

Aplicación de la segunda capa de resina epóxica sobre las bandas de fibra de vidrio



Figura 52

Sección de la columna terminada



Figura 53

Sección de la columna terminada

**Figura 54**

Sección de la columna terminada



Figura 55

Sección de la columna terminada



Figura 56

Estructura final del Colegio Americano de Guatemala

**Figura 57**

Sección de la columna terminada



Figura 58

Acabado final de las columnas del Colegio Americano de Guatemala



X. PROBLEMAS DEL SISTEMA

A. Problemas observados

Durante todo el proceso de diseño y construcción se observaron cientos de problemas que, de tomarse las medidas correctas, podrían eliminarse de una sola vez, los problemas observados más importantes son:

1. Diseño

- Falta de información de la estructura.
- Información de diseño poco accesible.
- Poco conocimiento del sistema a nivel general.

2. Construcción

- La forma del elemento puede ser un problema complicado.
- La superficie de los elementos estructurales no es perfecto.
- Los materiales usado por FRP pueden contaminarse fácilmente.
- Poco personal entrenado a nivel general.

B. Ventajas y desventajas del sistema

1. Ventajas

- a. Alta resistencia a la tensión
- b. Poco peso
- c. Resistente al ataque de químicos
- d. No se corroen
- e. Tiempos de instalación cortos
- f. Posibilidad de instalación en sitios de difícil acceso
- g. No reduce el espacio útil
- h. No altera la apariencia
- i. Por su flexibilidad a la hora de instalación, puede adoptar la forma de figuras geométricas complejas.

2. Desventajas: Sin duda la principal desventaja de la fibra es el elevado precio de los materiales utilizados para fabricar la misma debido a:
 - a. El refuerzo, fibra, es un polímero sintético que requiere un caro y largo proceso de producción. Este proceso se realiza a alta temperatura, entre 1100° y 2500°, en atmósfera de hidrógeno durante semanas o incluso meses dependiendo de la calidad que se desee obtener ya que pueden realizarse procesos para mejorar algunas de sus características una vez se ha obtenido la fibra.
 - b. El uso de materiales termoestables dificulta el proceso de creación de la pieza final.
 - c. No puede incrementarse la inercia de los elementos y en algunos casos debe utilizarse en combinación con muros de corte o breizas.
 - d. La aplicación en ciertos puntos de la estructura, como los nudos es complicada.
 - e. El porcentaje de eficiencia se reduce cuando se tienen elementos con formas extrañas.

XI. VALUACIÓN DEL USO DE LA FIBRA

- A. La valuación del uso FRP es cuantitativa y cualitativa, la primera es tratada en el capítulo 7 en el cual se puede observar que existe ya toda una forma numérica basada en una serie de investigaciones y pruebas que le dan un soporte suficiente al uso de este sistema de reforzamiento, y en algunos casos específicos son suficientes las teorías de resistencia de materiales para determinar los esfuerzos y refuerzos necesarios en cada caso, por supuesto que para ello deben de conocerse perfectamente las propiedades mecánicas de los materiales a usar.
- B. La valuación cualitativa es relativamente sencilla, y es el poder observar todo el procedimiento de instalación y reforzamiento, ya que se puede incrementar las diferentes capacidades del concreto reforzado (flexión, corte, confinamiento), sin tener que tocar la pieza existente, y que probablemente el trabajo más complicado sea la limpieza y nivelación de la superficie y el resto es un trabajo limpio, rápido, con poca mano de obra y con un mínimo peso agregado, también es importante darle valor a la poca molestia que le dio al usuario, ya que el impacto visual fue mínimo, y aunque no se permitió la circulación durante el proceso constructivo; las molestias se minimizaron, de la manera tradicional hubiese requerido demoliciones parciales, acarreo de ripio y se hubiese alargado el tiempo del reforzamiento.

XII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos, aunque no son fáciles de valorar para el usuario, sí los obtenidos por el Colegio Americano de Guatemala a largo plazo, ya que le queda a las autoridades una estructura con mayor capacidad para afrontar eventos futuros, con la cual se tendrá menores daños por lo que la hace una estructura más sana, menos vulnerable y con una inversión a largo plazo.

Luego de concluir con el trabajo de reforzamiento y remozamiento, la estructura tiene el mismo aspecto original pero ahora cuenta con una capacidad extra que es difícil de medir, pero el trabajo realizado se llevó a cabo como se había planeado y el resultado tiene una eficiencia muy alta y se alcanzaron los objetivos trazados.

Se completaron todos los procesos tanto de diseño como el de ejecución, aunque este trabajo no tenía contemplado el diseño estructural de la fibra se tocaron varios aspectos relacionados con el mismo, ya que ello ayuda a entender por qué debe usarse la fibra, con qué objetivos y en qué posiciones del elemento, también se adjuntó la forma cómo se calculó el refuerzo de la fibra en las columnas del pasillo principal del Colegio Americano de Guatemala, estructura que tiene una configuración especial.

Durante el proceso constructivo se abordaron todos los temas importantes en esta fase, llegándose a poder valorar los problemas que se tiene con este sistema; a pesar que es un sistema que conlleva muchísima tecnología la aplicación es relativamente sencilla y requiere un entrenamiento mínimo, mientras que la inspección sí requiere rigurosidad.

Al completar los procesos de diseño y construcción cumplimos con el cometido original que es entender lo que correspondía a diseño estructural, las principales bondades del sistema y cómo deben aplicarse correctamente; además, todas las fases de su instalación y se pudo comprobar que su uso es muy sencillo y se obtiene al final una estructura con una capacidad adicional a la original manteniendo la arquitectura original, ya que este sistema no altera formas; así mismo se pudo

observar que ya concluido el reforzamiento se tiene pleno conocimiento de cómo está conformada la estructura y se conoce más de su comportamiento esperado.

XIII. CONCLUSIONES

Como conclusión se tiene el hecho de haber comprobado el uso efectivo de la fibra como material de alto rendimiento, con unas propiedades mecánicas muy buenas para el uso de reforzar estructuras antiguas a las cuales se les quiere incrementar sus capacidades y atributos o restituir las capacidades perdidas luego de un evento sísmico.

El material es adecuado para el propósito original de reforzar una estructura sin necesidad de encamisados pesados que a largo plazo también le pueden crear otro tipo de problemas, mientras que usando este tipo de material o sistema no necesariamente debemos de tocar los cimientos cuyo reforzamiento es complicado y costoso.

Este tipo de reforzamiento es muy rápido, limpio y se le causa al usuario una mínima molestia, si es necesario trabajar sin suspender las actividades diarias, aunque en nuestra aplicación no se utilizó de esta manera.

Por último, es importante indicar que existe suficiente material teórico desarrollado, así como una gran cantidad de aplicaciones en laboratorio que sustentan el uso de la fibra de carbono o vidrio como reforzamiento externo y que tendrá un gran desarrollo en el futuro.

XIV. RECOMENDACIONES

Luego de elaborar este trabajo, durante el cual se estudió el desarrollo, diseño y aplicación general del sistema FRP, se detectó un número de problemas, ventajas y desventajas por lo que se puede elaborar una serie de recomendaciones para el uso apropiado de la fibra como sistema de reforzamiento.

La primera es el uso de la fibra, pero luego de elaborar un estudio serio de la estructura a tratar, ya que si bien, su uso es altamente efectivo de utilizarse sin análisis y diseño formal puede dar la sensación de contar con una estructura segura sin serla y utilizarla, incrementando el riesgo humano y económico con las consecuencias del caso.

La segunda es tener todo el proceso, desde el diseño hasta la aplicación final bien documentado, ya que ello tiene un gran valor para los siguientes usuarios luego de reforzar, ya que pueden valorar el cómo se hizo y luego valorar los daños a partir de información confiable, así podrán tener un récord histórico completo de la estructura que tienen bajo su administración.

Aunque la estructura en cuestión esté recién reforzada debe contar con un seguro contra todo riesgo, ya que el reforzamiento no nos garantiza que la estructura es indestructible o pueda tener daño de algún tipo.

En cualquier caso, aunque no se piense en reforzar una estructura, debe tratarse de recuperar la mayor información de la estructura que se esté administrando, ya que no se sabe en qué momento el reforzamiento será necesario, pudiéndose anticipar con este trabajo, sin tener que hacer una gran inversión, en todo caso debe pensarse que los trabajos deben ser preventivos.

Cualquier obra debe ser motivo de evaluación en cualquier momento y dejarse este trabajo bien documentado y asegurarse que este trabajo sea elaborado por un especialista en su ramo.

XV. BIBLIOGRAFÍA

1. A.C.I., American Concrete Institute Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI 440. 2R-01 (2001)
2. A.I.J., Architectural Institute of Japan, *Design and Construction Guideline of Continuous Fiber Reinforced Concrete*, AIJ (2002)
3. F.I.B., Federation International de Béton, *Externally Bonded FRP Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, FIB CEB-FIP, (2001)
4. *Fiber Reinforced Polymer Fabric*. ACI Structural Journal: 99 (5), 692-700 (2002).
5. Sika, Composite Strengthening Systems. *Engineering Guidelines for Design and Application*. Zurich (1999).