



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

**DISEÑO DEL REFORZAMIENTO PARA LA REPARACIÓN O AUMENTO DE
CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS PARA PUENTES DE CONCRETO
REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**

Carlos Helamán Ibáñez López

Asesorado por el Msc. Ing. Ernesto Salvador Guzmán Escobar

Guatemala, julio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DEL REFORZAMIENTO PARA LA REPARACIÓN O AUMENTO DE
CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS PARA PUENTES DE CONCRETO
REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS HELAMÁN IBAÑEZ LÓPEZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. ERNESTO SALVADOR GUZMÁN ESCOBAR

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JULIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

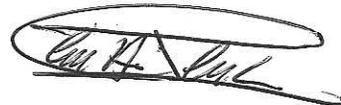
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordóñez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DEL REFORZAMIENTO PARA LA REPARACIÓN O AUMENTO DE CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS PARA PUENTES DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
con fecha septiembre 2011.



Carlos Helamán Ibañez Lopez

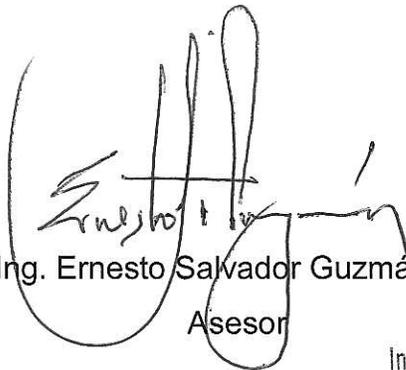
Guatemala 11 de marzo de 2013

Ingeniero Civil
Ronald Estuardo Galindo Cabrera
Coordinador de Área de Estructuras
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Por este medio le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DEL REFORZAMIENTO PARA LA REPARACIÓN O AUMENTO DE CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS PARA PUENTES DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**, que desarrolló el estudiante **Carlos Helamán Ibáñez López**, con número de **Carné 200212606**, el cual cumple con los objetivos propuestos, por lo que doy mi aprobación, siendo co-responsable del contenido del mismo.

Sin otro particular, me suscribo a usted.

Atentamente,



Msc. Ing. Ernesto Salvador Guzmán Escobar

Asesor

Ing. Ernesto Salvador Guzmán
Colegiado No. 4,500



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
17 de abril de 2013

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **DISEÑO DEL REFORZAMIENTO PARA LA REPARACIÓN O AUMENTO DE CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS PARA PUENTES DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Carlos Helamán Ibáñez López, quien contó con la asesoría del Ing. Ernesto Salvador Guzmán Escobar.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

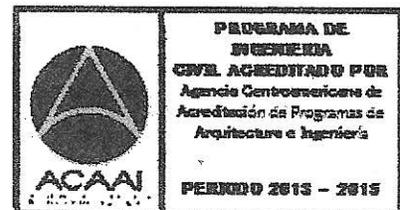

Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
Jefe del Departamento de Estructuras



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
ESTRUCTURAS
USAC

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Ernesto Salvador Guzmán Escobar y del Jefe del Departamento de Estructuras, Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera, al trabajo de graduación del estudiante Carlos Helamán Ibáñez López, titulado **DISEÑO DEL REFORZAMIENTO PARA LA REPARACIÓN O AUMENTO DE CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS PARA PUENTES DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

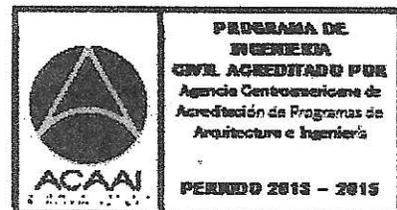

 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, julio de 2013.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 484.2013

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: **DISEÑO DEL REFORZAMIENTO PARA LA REPARACIÓN O AUMENTO DE CAPACIDAD DE CARGA DE VIGAS PARA PUENTES DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Helamán Ibañez López**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 10 de julio de 2013

/gdech



AGRADECIMIENTOS A:

Mi padre celestial

Por prestarme la vida, darme sabiduría, y la capacidad para culminar esta etapa de mi vida.

Mis padres

Por su apoyo constante, amor, ejemplo de trabajo y dedicación.

Mis hermanos

Por su apoyo en todo momento.

**Universidad de San Carlos
de Guatemala**

Por enseñarme, prepararme y darme las herramientas necesarias para el mundo laboral.

Grupo Muratori

Por su asesoría, apoyo durante la preparación de este documento y darme la experiencia en este campo de la ingeniería.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. GENERALIDADES	1
1.1. Ingeniería de puentes	1
1.2. Tipos de cargas en puentes	7
1.2.1. Cargas vivas	8
1.2.2. Cargas muertas	9
1.3. Análisis estructural de puentes	9
1.3.1. Líneas de influencia	9
1.4. Tipo de fallas en vigas de puentes de concreto reforzado	11
1.4.1. Métodos de diagnóstico y evaluación de estructuras	12
1.4.2. Métodos de reparación	16
1.4.3. Métodos de reforzamiento	17
1.5. Refuerzo de fibra de carbono	21
1.5.1. Historia	21
1.5.2. Aplicación de fibra de carbono en estructuras de concreto reforzado	24
1.5.2.1. Consideraciones	24
1.5.2.2. Filosofía de diseño	26

	1.5.2.3.	Refuerzo a flexión.....	27
	1.5.2.4.	Propiedades de los materiales.....	27
	1.5.2.5.	Modos de falla del refuerzo CFRP.	29
	1.5.2.6.	Principios de diseño con refuerzo CFRP externamente adherido	32
	1.5.3.	Utilización de fibra de carbono en Guatemala	47
2.	DISEÑO DE VIGA DE CONCRETO REFORZADO PARA CAMIONES HS-15 Y HS-20		49
2.1.	Diseño de viga bajo camión de carga HS-15.....		49
	2.1.1.	Consideraciones de diseño.....	49
	2.1.2.	Predimensionamiento de la viga	50
	2.1.3.	Memoria de cálculo.....	51
	2.1.4.	Cálculo de momento máximo	55
	2.1.5.	Diseño final de la viga.....	61
2.2.	Diseño de viga bajo camión de carga HS-20.....		63
	2.2.1.	Consideraciones de diseño.....	63
	2.2.2.	Predimensionamiento de la viga	64
	2.2.3.	Memoria de cálculo.....	64
	2.2.3.1.	Determinación de la carga muerta	64
	2.2.3.2.	Determinación de la carga viva.....	64
	2.2.4.	Cálculo de momento máximo	65
	2.2.4.1.	Líneas de influencia: camión está en x=10,00 metros (centro de la viga).....	65
	2.2.4.2.	Líneas de influencia: el camión está en x=9,29 metros (momento máximo).....	66
	2.2.5.	Diseño final de la viga.....	69

2.3.	Comparación entre las vigas diseñadas para HS-15 y HS-20	70
2.3.1.	Diferencia de momentos máximos	70
2.3.2.	Refuerzo necesario para aumentar la capacidad de carga de camión de carga HS-15 a HS-20	71
3.	ANÁLISIS DE REPARACIÓN Y DE REFUERZO DE VIGA DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO	73
3.1.	Evaluación y análisis de la viga de concreto reforzado dañada	73
3.2.	Cálculo de refuerzo con fibra de carbono	76
3.2.1.	Detalle del refuerzo CFRP	98
3.3.	Método constructivo de reparación	102
3.4.	Método de aplicación de refuerzo CFRP	104
3.4.1.	Preparación de la superficie	104
3.4.2.	Mezcla de las resinas epóxicas	105
3.4.3.	Normas de seguridad	106
3.4.4.	Aplicación de refuerzo CFRP a flexión	106
3.4.5.	Aplicación de refuerzo CFRP a corte	108
3.4.6.	Detalles de colocación	111
4.	LIMITACIONES EN LA APLICACIÓN DE FIBRA DE CARBONO PARA LA REPARACIÓN DE PUENTES	115
4.1.	Alto costo del material	115
4.2.	Baja resistencia transversal	116
4.3.	Diseño especializado	116
4.4.	Resistencia mínima de la superficie de aplicación	117
4.5.	Preparación especial de la superficie de aplicación	117
4.6.	Resistencia mínima de las estructuras	117

5.	PRESENTACIÓN REAL DE CASO DE APLICACIÓN DE FIBRA DE CARBONO EN LA REPARACIÓN DE PUENTE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA.....	119
5.1.	Daños en las vigas.....	120
5.2.	Ensayos no destructivos.....	121
5.3.	Refuerzo con fibra de carbono	123
5.4.	Sellado de grieta en viga.....	126
5.5.	Protección del refuerzo de fibra de carbono	127
	CONCLUSIONES	131
	RECOMENDACIONES	133
	BIBLIOGRAFÍA.....	135

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Puente de luz simple.....	3
2.	Puente en arco.....	3
3.	Puentes cantiliver.....	4
4.	Puente colgante y atirantado.....	5
5.	Puente basculante	5
6.	Partes del puente	7
7.	Camiones de carga HS-15 y HS-20	8
8.	Tren de carga y corte máximo.....	10
9.	Tren de carga y momento máximo.....	11
10.	Inyección de grieta con epóxico	18
11.	Refuerzo de viga con platina de acero	19
12.	Refuerzo con concreto y barras de acero.....	20
13.	Configuraciones del tendón de postensado	21
14.	Pérdida de adherencia y delaminación.....	31
15.	Altura efectiva para refuerzo CFRP	34
16.	Representación gráfica del factor de reducción.....	36
17.	Nivel de momento aplicado que debe ser utilizado para verificar límites de esfuerzos en el refuerzo CFRP	38
18.	Distribución interna de deformación unitaria y esfuerzos para una sección rectangular bajo flexión en el estado límite último	39
19.	Distribución elástica de deformación unitaria y esfuerzos	45
20.	Camión de carga HS-15.....	49
21.	Sección de superestructura.....	50

22.	Sección de viga T	52
23.	Línea de influencia en $x=10,00$ m	57
24.	Línea de influencia en $x=9,29$ m	59
25.	Tabla de coeficientes γ y β	61
26.	Camión de carga HS-20	63
27.	Línea de influencia en $x=10,00$ metros	66
28.	Línea de influencia en $x=9,29$ metros	67
29.	Ecuaciones para calcular esfuerzos de servicio en acero y refuerzo CFRP	97
30.	Terminación de varias capas de refuerzo FRP	100
31.	Diagrama de momentos carga HS-20.....	101
32.	Detalle refuerzo CFRP	102
33.	Refuerzo CFRP tipo platina para flección	107
34.	Aplicación de resina epóxica a refuerzo CFRP	108
35.	Refuerzo CFRP tipo tejido de fibras de fibra de carbono	109
36.	Aplicación de la resina epóxica en el refuerzo CFRP	109
37.	Preparación del refuerzo CFRP embebido de resina epóxica	110
38.	Colocación del refuerzo CFRP a corte	111
39.	Anclajes en extremos de refuerzo CFRP	113
40.	Daño de refuerzo CFRP	116
41.	Daños de vigas 1, 2, 3, 4, 5	120
42.	Daños de vigas 6, 7, 8, 9, 10	121
43.	Ensayos no destructivos	121
44.	Limpieza de suciedad y remoción del óxido.....	122
45.	Recuperación de área de acero y recuperación de la sección de concreto de vigas.....	123
46.	Preparación de la superficie	125
47.	Preparación del platina de refuerzo CFRP.....	125
48.	Preparación y colocación de refuerzo CFRP tipo tejido	126

49.	Sellado de grieta en viga 1	127
50.	Vista del refuerzo CFRP colocado en las vigas	128
51.	Aplicación de impermeabilizante sobre el refuerzo de fibra de carbono	128
52.	Impermeabilizante aplicado sobre refuerzo CFRP	129

TABLAS

I.	Luz cubierta por cada tipo de puente	6
II.	Factores de reducción ambiental	29
III.	Momento sostenido más esfuerzos límites de cargas cíclicas de servicio.....	38
IV.	Factor de distribución de rueda para vigas.....	54
V.	Comparación de momentos y área de acero.....	70
VI.	Propiedades de la superestructura.....	74
VII.	Propiedades de la fibra de carbono.....	75
VIII.	Cargas y momentos	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
d_f	Altura efectiva del refuerzo FRP a flexión.
B	Ancho de la cara a compresión del elemento, mm.
b_w	Ancho del alma de la viga, mm.
H	Ancho o alto total del elemento, mm.
A_s	Área de acero de refuerzo, mm ² .
A_f	Área de refuerzo externo FRP, mm ² .
A_g	Área gruesa de la sección de concreto, mm ² .
P	Carga mayor de la rueda del camión de diseño, Ton.
P'	Carga menor de la rueda del camión de diseño, Ton.
W_{DL}	Carga muerta.
W_{LL}	Carga viva.
M_{ns}	Contribución del acero de refuerzo a la resistencia nominal a flexión, N-mm.
M_{nf}	Contribución del refuerzo FRP a la resistencia nominal a flexión, N-mm.
y_t	Coordenada vertical dentro de la región a compresión medida desde el eje neutro. Corresponde a deformación unitaria de transición ϵ'_t , mm.
ρ	Cuantía de refuerzo, mm ² .
ρ_s	Cuantía del acero de refuerzo, mm ² .
ρ_f	Cuantía del refuerzo FRP, mm ² .

ϵ_{sy}	Deformación unitaria correspondiente a la resistencia a la fluencia del acero de refuerzo, mm/mm.
ϵ_{fu}	Deformación unitaria de diseño de ruptura del refuerzo FRP, mm/mm.
ϵ'_t	Deformación unitaria de transición en la curva esfuerzo-deformación del concreto confinado con FRP, mm/mm.
ϵ_c	Deformación unitaria del concreto, mm/mm.
ϵ_{fe}	Deformación efectiva del refuerzo FRP alcanzada en la falla, mm/mm.
ϵ_f	Deformación unitaria del refuerzo FRP, mm/mm.
ϵ_{bi}	Deformación unitaria del substrato del concreto al momento de la instalación del refuerzo FRP, mm/mm.
ϵ_t	Deformación unitaria neta a tensión en el acero extremo a tensión de resistencia nominal, mm/mm.
ϵ_{fd}	Deformación unitaria por falta de adherencia de refuerzo FRP externamente adherido, mm/mm.
ϵ_{cu}	Deformación unitaria última del concreto no confinado correspondiente a $0,85f'_{c0}$ ó deformación máxima utilizable de concreto no confinado, mm/mm, que puede ocurrir a $0,85f'_c$ o 0,003, dependiendo de la curva esfuerzo – deformación.
ϵ_{fu}^*	Deformación unitaria última de ruptura del refuerzo FRP, mm/mm.
d	Distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión, mm.

C	Distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el eje neutro, mm.
S_{DL}	Efectos de la carga muerta.
S_{LL}	Efectos de la carga viva.
$f_{c,s}$	Esfuerzo de compresión en el concreto bajo condiciones de servicio, N/mm ² .
f_{fe}	Esfuerzo efectivo en el FRP; esfuerzo alcanzado en la sección de falla, N/mm ² .
$f_{s,s}$	Esfuerzo en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio, N/mm ² .
f_s	Esfuerzo en el acero de refuerzo, N/mm ² .
$f_{f,s}$	Esfuerzo en el refuerzo FRP causado por el momento dentro del rango elástico del elemento, N/mm ² .
t_f	Espesor nominal de una capa de refuerzo FRP, mm.
Fd	Factor de distribución.
FI	Factor de impacto.
C_E	Factor de reducción ambiental.
\emptyset	Factor de reducción de resistencia.
ψ_f	Factor de reducción de resistencia del FRP, 0,85 para flexión, calibrado según en propiedades de diseño del material.
l_{df}	Longitud de desarrollo del sistema FRP, mm.
L	Longitud de la viga, m.
ϵ'_c	Máxima deformación de concreto no confinado correspondiente a f'_c , mm/mm; su valor puede ser tomado como 0,002.
Ksi	1 000 psi

E_f	Módulo de elasticidad a tensión del FRP, N/mm ² .
E_S	Módulo de elasticidad del acero, N/mm ² .
f_r	Módulo de ruptura.
M_L	Momento Carga viva, Ton-m.
M_{cr}	Momento de fisuramiento del concreto.
I_{cr}	Momento de inercia de la sección transformada fisurada, mm ⁴ .
I_g	Momento de inercia de sección gruesa.
M_s	Momento de servicio de la sección, N-mm.
M_{d1}	Momento dos de carga muerta.
M_u	Momento factorado de la sección, N-mm.
M_{dTotal}	Momento total de carga muerta.
M_{d1}	Momento uno de carga muerta.
α_1	Multiplicador del f'_c para determinar la intensidad del rectángulo equivalente de esfuerzos del concreto.
n	Número de capas de refuerzo FRP.
$W_{Rodadura}$	Peso de la carpeta de rodadura.
W_{Losa}	Peso de la losa.
W_{Viga}	Peso de la viga.
$W_{diafragma}$	Peso del Diafragma.
W_{Total}	Peso total.
$\sqrt{f'_c}$	Raíz cuadrada de la resistencia a compresión especificada del concreto.
β_1	Razón de la profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos y la profundidad del eje neutro.

k	Razón de la profundidad del eje neutro con la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.
f_{fu}^*	Resistencia última de tensión de diseño el FRP reportada por el fabricante, MPa.
f_{fu}	Resistencia última de tensión de diseño el FRP, N/mm ² .
f'_c	Resistencia a compresión del concreto, N/mm ² .
f_y	Resistencia a la fluencia nominal de acero de refuerzo, N/mm ² .
V_u	Resistencia de corte factorado, N.
V_c	Resistencia de corte nominal del concreto proveída por el acero de refuerzo, N.
M_n	Resistencia nominal a flexión, N-mm.
R_n	Resistencia nominal del elemento.
S	Separación entre almas de viga, m.

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
ACI	American Concrete Institute.
Aglutinante	Tratamiento químico aplicado al arreglo de fibras para darles integridad. Se utilizan para proveer compatibilidad con las resinas.
ASTM	American Society for Testing Materials.
Camión de diseño	Camión de peso estándar utilizado para el diseño del puente.
Carga cíclica	Carga aplicada sobre el puente en ciclos constantes.
Carga de servicio	La carga especificada por el reglamento general de construcción, sin factor de carga.
Carga distribuida	Carga aplicada sobre toda la longitud del puente.
Carga muerta	Carga permanente de la estructura, incluye el peso propio.

Carga unitaria	Carga de magnitud uno.
Carga viva	Carga no permanente que puede cambiar de posición.
Cargas dinámicas	Carga que se aplica a una estructura, a menudo acompañada de cambios repentinos de intensidad y posición.
Carbon Fiber-reinforced polymer (CFRP)	Material compuesto que en forma de una matriz de polímero reforzada con fibra de carbono en diferentes formas.
Compatibilidad de deformaciones	Propiedad de materiales diferentes de deformarse en magnitudes iguales al ser sometidos a una misma carga.
Compuesto	Materiales de ingeniería hechos por dos o más materiales que permanecen distintos, pero se combinan para formar materiales con propiedades que no poseen ninguno de sus partes individuales. Los materiales son generalmente una matriz y refuerzo o una matriz y agregados.
Concreto armado	Combinación del concreto con acero de refuerzo.

Concreto preesforzado	Concreto al cual se le aplica un esfuerzo permanente con el propósito de mejorar su resistencia y comportamiento.
Cuantía	Relación entre área de acero y área de la sección del elemento.
Cuantía máxima	Relación máxima permitida en un elemento de concreto reforzado para producir una falla dúctil.
Deformación inelástica	Deformación de un miembro suficientemente substancial para exceder el límite elástico del material dando por resultado un cambio en la forma geométrica.
Deformación unitaria	Deformación de la longitud por unidad de longitud.
Delaminación	Separación de material a lo largo de un plano paralelo a la superficie del sustrato.
Ductilidad	Propiedad del material de deformarse hasta cierto punto sin romperse.
Eje neutro	Línea divisoria de un elemento deformado por flexión, que separa la zona a compresión de la zona en tensión.

Ensayos destructivos	Ensayo que altera de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o de forma del elemento que se analiza.
Ensayos no destructivos	Ensayo no que altera de forma permanente las propiedades físicas, químicas, mecánicas o de forma del elemento que analiza.
Esfuerzo a flexión	Combinación de los esfuerzos de compresión y de tracción que actúan en la sección transversal de un elemento estructural para ofrecer resistencia a una fuerza transversal.
Esfuerzo de corte	El esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un prisma mecánico.
Factor de distribución	Factor que indica la distribución de carga de las ruedas del camión sobre las vigas del puente.
Factor de impacto	Factor que indica la fuerza aplicada a la estructura cuando un vehículo ingresa al puente.
Factor de reducción	Factores que se aplican para tomar en cuenta los defectos y propiedades de los materiales.
FHWA	Federal Highway Administration.

Fibra de carbono	Fibra producida por calentamiento de materiales orgánicos que contienen una cantidad considerable de carbono, como rayón, poliacrilonitrilo (PAN), o tratado en un ambiente inerte a temperaturas de $2\ 700^{\circ}\text{C}$ o mayores.
Flujo plástico	Ruptura del material bajo esfuerzos sostenidos menores que su resistencia a la tracción.
Fiber-reinforced polymer (FRP)	Término utilizado para un material compuesto que comprende una matriz de polímero reforzado con fibras en forma de tela, hebras o cualquier otra forma.
Impregnar	Saturar la fibra con resina o aglutinante.
JCI	Japan Concrete Institute.
JSCE	Japan Society of Civil Engineers.
Ley de Hook	Ley de física que establece que la deformación unitaria de un material es proporcional a la fuerza aplicada.
Límite de fluencia	Es el punto a partir del cual el material se deforma plásticamente.

Líneas de influencia	Método para determinar la variación de la magnitud de las reacciones en un punto determinado al aplicar una carga móvil.
Longitud de desarrollo	Longitud de adherencia requerida para lograr el esfuerzo de diseño del refuerzo en una sección crítica.
Matriz	Resina o aglutinante que sostiene las fibras FRP juntas, transfiere la carga a las fibras y las protege del ambiente y de daños por manipulación.
Módulo de elasticidad	Es la Razón entre el esfuerzo normal y su deformación correspondiente para esfuerzos de tensión-compresión bajo el límite proporcional del material; también llamado módulo de Young.
Momento de fisuramiento	Magnitud del momento en el cual se presentan las primeras fisuras en el concreto.
Momento de inercia	Medida de la inercia rotacional de un cuerpo, representa la distribución de masa de un cuerpo respecto a un eje de giro.
NSF	National Science Foundation.

Poliacrilonitrilo (PAN)	Polímero basado en material que es hilado en forma de fibra y utilizado como precursor en la manufactura de fibra de carbono.
Postensado externo	Método de preesfuerzo en el que el acero se tensiona después que el concreto endurece dejando el cable afuera del elemento.
Pull-off	Prueba de resistencia de tensión de una superficie de concreto.
Resina epóxica	Polímero termoestable utilizado para adherir o cubrir compuestos de FRP o concreto.
RTRI	Railway Technical Research Institute.
Sand Blasting	Método de limpieza por abrasión que utiliza chorros de arena lanzadas a presión.
Subestructura	Estructura inferior del puente que funciona como cimentación.
Substrato	Cualquier material sobre la superficie en donde se coloca otro material.
Superestructura	Estructura superior del puente que soporta el paso del tráfico.

Torón

Grupo de alambres que tiene un alambre central encerrado firmemente por seis alambres exteriores colocados en forma helicoidal con una pendiente de no menos de 12 y no más de 16 veces el diámetro nominal del torón.

Tren de carga

Conjunto de cargas que se desplazan por una trayectoria bien definida.

RESUMEN

El presente documento expone la filosofía y metodología de diseño del refuerzo de elementos a flexión con material FRP de fibra de carbono. Se exponen los criterios básicos para diseñar e instalar este tipo de refuerzo en estructuras de concreto reforzado según el código ACI 440.2R-08. Se hace una exposición corta de los elementos de un puente, las cargas que lo afectan y el método líneas de influencia para el análisis del comportamiento de la superestructura.

También se exponen los principales métodos de diagnóstico y evaluación de estructuras de concreto, métodos tradicionales de reparación y refuerzo de los elementos a flexión para vigas de puentes. Se exponen las características de la fibra de carbono, historia, códigos existentes, consideraciones de diseño, requisitos de aplicación para elementos sometidos a flexión, sus ventajas y desventajas y las limitaciones para su aplicación.

Toda la información teórica recopilada se aplica a un caso de reforzamiento de una viga de concreto reforzado que se diseña para una carga HS-15 y que se desea reforzar para una carga HS-20 después de ser dañada por un golpe. Para esto se diseñan las dos vigas y con estos datos se procede a calcular la cantidad de refuerzo FRP de fibra de carbono para reforzarla explicando de forma clara el proceso de reparación y diseño.

Al final del documento se presenta un caso real de reparación y refuerzo de las vigas de un puente de la ciudad de Guatemala en 2011, se puede

observar la gravedad del daño, los pasos del método de reparación de las vigas y paso a paso la colocación del refuerzo de fibra de carbono.

OBJETIVOS

General

Presentar un método de diseño para la reparación y reforzamiento con fibra de carbono en vigas de puentes de concreto reforzado, que presentan fallas o golpes graves.

Específicos

1. Identificar ventajas y desventajas de este método de reparación en vigas de puentes.
2. Identificar las fallas y daños más graves que se pueden reparar con este método.
3. Calcular de refuerzo necesario con fibra de carbono para devolver a la viga de concreto reforzado su capacidad de carga inicial o aumentar su capacidad de carga.
4. Presentar un caso real de reparación y reforzamiento con fibra de carbono en puentes de concreto reforzado en Guatemala.

INTRODUCCIÓN

Muchos de los puentes en Guatemala; más que todo en la ciudad de Guatemala, tienen más de 30 años de antigüedad y fueron diseñados para cargas menores a las que en la actualidad se utilizan y transitan sobre ellos, esto ocasiona que las vigas de concreto reforzado sean expuestas a un sobre esfuerzo que excede su capacidad de carga provocando la aparición de fisuras que debilitan la estructura. Adicionalmente algunos camiones que circulan bajo ellos en algunas ocasiones llevan carrocerías o cargas demasiado altas que en ocasiones golpean las vigas, dañándolas seriamente y poniendo en peligro la estructura.

Algunos de los puentes no se pueden demoler para reemplazarlos por ser vías principales, y su costo e impacto en el tráfico sería demasiado alto, por lo que se hace necesario buscar métodos de reforzamiento que cumplan con los requisitos de carga de la actualidad. Existen varios métodos de reforzamiento, y este documento se centra en presentar un método de diseño y proceso de aplicación del refuerzo con fibra de carbono, método muy poco utilizado en Guatemala para este tipo de estructuras.

Se exponen la filosofía y consideraciones de diseño para reforzamiento de elementos a flexión, propiedades de este material, sus ventajas y desventajas. Se realiza un ejemplo de diseño y refuerzo para una viga de concreto reforzado para un puente de 20 metros de luz y se expone la reparación y reforzamiento de las vigas de un puente de la ciudad de Guatemala.

1. GENERALIDADES

1.1. Ingeniería de puentes

La humanidad en su afán de construir caminos para conectar ciudades y moverse ha tenido la necesidad de cruzar ríos, barrancos o cualquier otro obstáculo con tal de llegar a su destino, para hacerlo han construido puentes, tan simples como un tronco apoyado sobre cada orilla de un río o tan complejos como puentes colgantes o atirantados como los que se construyen en la actualidad. El diseño del tipo de puente a utilizar depende de varios factores, como el tipo de material a utilizar, la longitud de la luz a cubrir, el tipo de tránsito que pasará sobre él, ya sea peatonal o vehículos livianos o pesados, la topografía del lugar y el costo del proyecto.

Su diseño se basa en los principios de la ingeniería estructural y resistencia de materiales que fueron descubiertos por grandes matemáticos y físicos, tales como Galileo Galilei quien estudió la resistencia de los sólidos a la rotura; Robert Hook quien introduce la teoría de los arcos y los resortes conocida como Ley de Hook; Thomas Young quien indicó la importancia de las cargas dinámicas en los puentes e introdujo el concepto de módulo de elasticidad y trató problemas de flexión de vigas en voladizo; Charles August Coulumb y Navier quienes publicaron el primer análisis correcto de esfuerzos en una viga de sección rectangular, aplicó la ley de Hooke a las fibras de una sección de viga, situó la superficie neutra en su posición correcta, consideró la etapa plástica e indicó que en la falla, bajo ciertas condiciones, la superficie neutra debería moverse a otra posición.

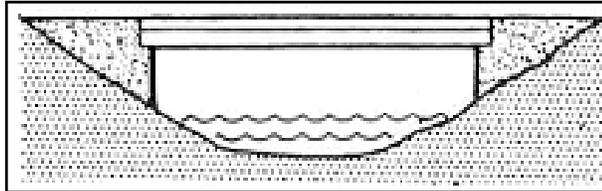
Otras contribuciones notables a la ingeniería estructural fueron hechas por Clepeyron quien presentó el “Teorema de los tres momentos” para analizar vigas continuas; Winkler quien introdujo las “Líneas de influencia”; Otto Mohr quien desarrolló el método para determinar las deflexiones en vigas conocido como el método de la “viga conjugada” e introdujo el método del “Circulo de Mohr” para la representación gráfica de los esfuerzos en un estado biaxial de esfuerzos y Heinrich Müller-Breslau quien descubrió que la línea de influencia para la reacción, o una fuerza interna de una estructura, era en alguna escala la elástica producida por una acción similar a esa reacción o fuerza interna, conocido como el “teorema de Müller-Breslau” que es la base del análisis de cargas que se mueven permanentemente cuya magnitud no es conocida con precisión, cargas vivas que representan el efecto de los vehículos en los puentes.

Existen diversos tipos de puentes que se clasifican según su utilidad, material, localización de la calzada y el tipo de estructura. Pueden ser de madera, concreto reforzado o preesforzado, metálicos o mixtos. Según la localización de la calzada pueden ser puentes de paso superior, de paso intermedio o de paso inferior. Según su utilidad pueden ser puentes peatonales, puentes para carreteras, puentes para vías férreas, puentes para paso de tuberías y puentes para grúas. Y según el tipo de estructura pueden ser:

- Puentes de luz simple

Es el puente más simple, está formado por vigas que están simplemente apoyadas en dos muros o estribos, pudiendo tener varios tramos o uno solo. Las vigas pueden ser de madera, concreto armado o preesforzado.

Figura 1. **Puente de luz simple**

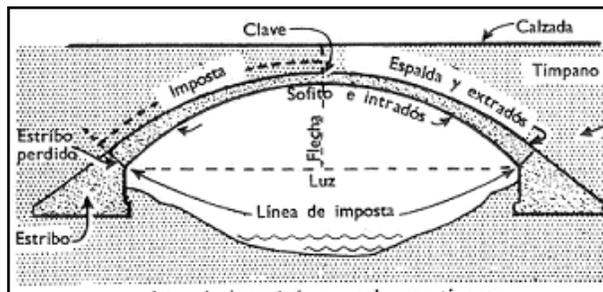


Fuente: apuntes del curso de Puentes, Facultad de Ingeniería USAC. p.10.

- **Puentes en arco**

Sus apoyos están en los extremos de la luz, entre los cuales existe una estructura en forma de arco por donde se transmiten las cargas, funciona completamente a compresión. La losa puede estar apoyada o colgando del arco, puede ser hecho de acero, concreto o madera, dependiendo del tamaño de la luz que se quiera cubrir.

Figura 2. **Puente en arco**

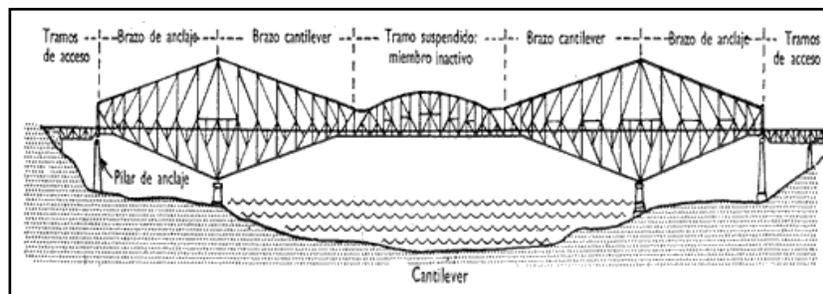


Fuente: apuntes del curso de Puentes, Facultad de Ingeniería USAC. p.11.

- Puentes Cantiléver

Constan esquemáticamente de dos voladizos simétricos que salen de dos pilas contiguas, uniéndose al centro por unas vigas apoyadas y suelen anclarse en los estribos simétricamente opuestos respecto al centro. Este tipo de puentes presenta diversas construcciones en arco o viga, de acero y concreto, pudiendo salvar grandes luces sin necesidad de estructuras auxiliares de apoyo durante su construcción.

Figura 3. Puentes cantiliver



Fuente: apuntes del curso de Puentes, Facultad de Ingeniería USAC. p.12.

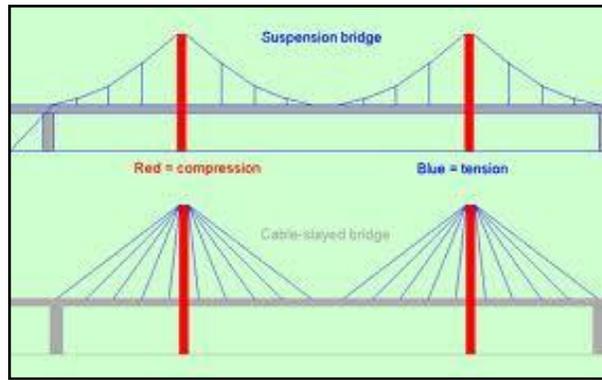
- Puentes colgantes o atirantados

Su tablero está sostenido por cables que cuelgan de un cable en forma de arco invertido. Una variación son los puentes atirantados, que constan de un tablero que es sostenido por un grupo de cables sujetos a una torre.

- Basculantes

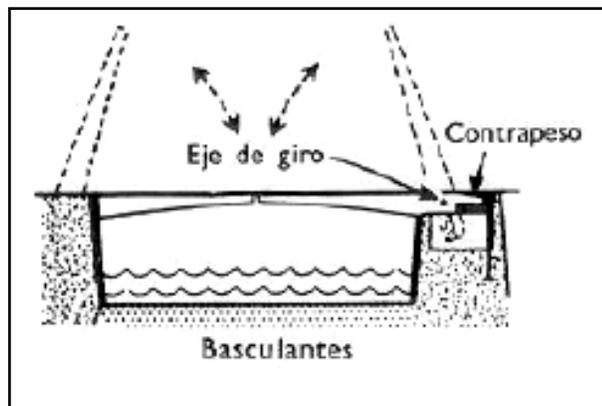
Son los que giran alrededor de un eje horizontal situado en la línea de los apoyos, para permitir el paso de embarcaciones en el río.

Figura 4. **Puente colgante y atirantado**



Fuente: apuntes del curso de Puentes, Facultad de Ingeniería USAC. p.12.

Figura 5. **Puente basculante**



Fuente: apuntes del curso de Puentes, Facultad de Ingeniería USAC. p.13.

Cada tipo de puente tiene puede cubrir cierta longitud de claro, la tabla I muestra la longitud de claro máximo que puede cubrir cada tipo de puente.

Tabla I. Luz cubierta por cada tipo de puente

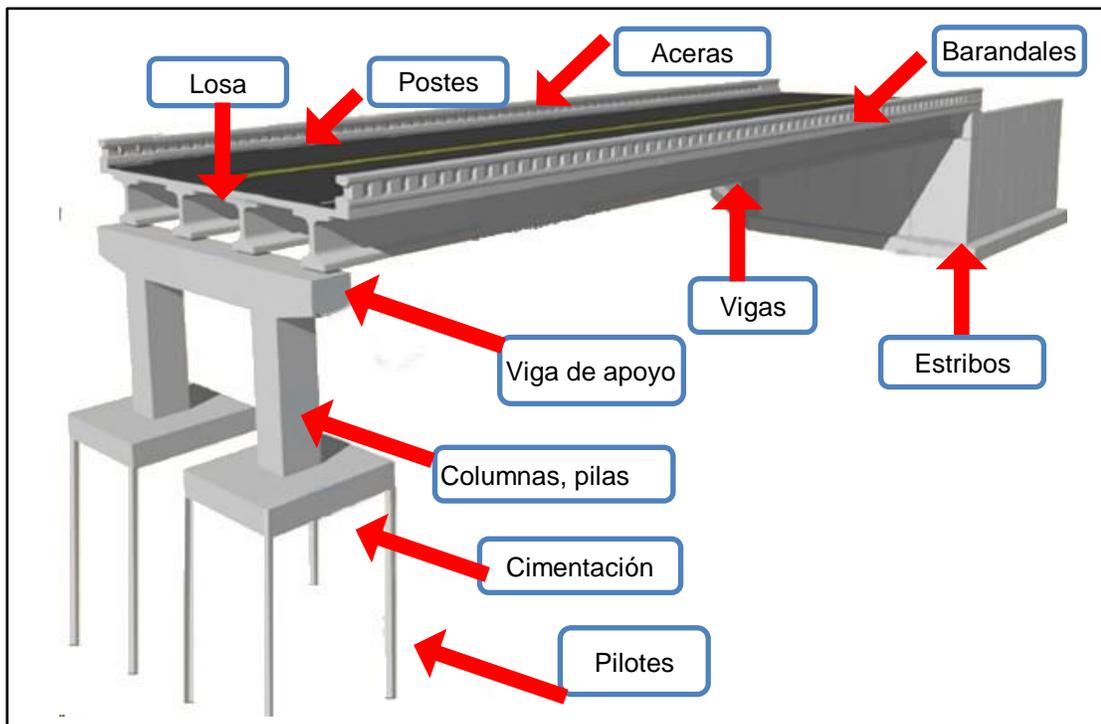
TIPO DE PUENTE	LONGITUD DE CLAROS DE PUENTES (M)																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	125	150	200	400	600	800	1000	
Vigas Prefabricadas		■	■	■	■	■	■											
Al Avance con Dovelas Prefabricadas		■	■	■	■	■	■	■										
Empujados		■	■	■	■	■	■	■	■									
Doble Voladizo					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■				
Acostillados													■	■	■			
Atirantados																		■
Arcos						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			

Fuente: Seminario técnico sobre diseño de puentes fluviales Parte II.

Los puentes se dividen en dos partes fundamentales, la superestructura y la subestructura. La superestructura es la parte superior del puente, para puentes de concreto está conformada por un tablero o losa, vigas principales, banquetas, postes y barandales y diafragmas. El tablero soporta directamente las cargas dinámicas y por medio de las vigas principales transmite las cargas hacia las pilas y estribos.

La subestructura está formada por la viga de apoyo, que trasmite las cargas de la losa a las pilas o estribos; las pilas, son los apoyos intermedios en puentes de dos o más tramos que transmiten las cargas a las cimentaciones; los estribos están situados en los extremos del puente y sostienen los terraplenes que conducen al puente; las cimentaciones o apoyos de los estribos y pilas, que son los encargados de transmitir al terreno toda la carga, están formados por pilotes o zapatas.

Figura 6. Partes del puente



Fuente: Seminario diseño de puentes LRFD.

1.2. Tipos de cargas en puentes

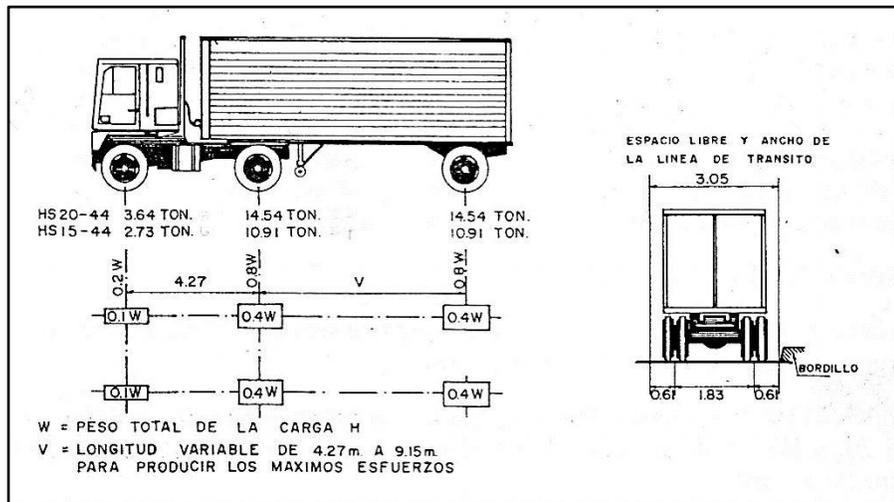
La estructura de un puente debe ser diseñada para soportar diferentes cargas a las que es expuesto. Existen cargas que actúan sobre la subestructura y cargas que actúan sobre la superestructura, siendo algunas de estas últimas las que se tratarán en el presente documento.

Las cargas que actúan sobre la superestructura se dividen en:

- Cargas gravitacionales: cargas vivas, cargas muertas y de impacto.
- Cargas Laterales: cargas de viento, sismo y fuerza centrífuga.

- Cargas Longitudinales: cargas por variaciones de temperatura y fuerzas debido a la carga viva.

Figura 7. Camiones de carga HS-15 y HS-20



Fuente: BARRERA, Jerónimo H. Puentes. p.26.

1.2.1. Cargas vivas

La carga viva corresponde a la carga vehicular, de trenes, peatones, etc. es decir, toda aquella carga que su magnitud y localización no es constante. La American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) ha estandarizado esta carga utilizando camiones de diseño. En este documento se tratarán los camiones tipo HS-15 y HS-20. Las siglas HS indican que el camión tiene 3 ejes de ruedas y el número 15 o 20 indica el peso del camión en toneladas inglesas.

1.2.2. Cargas muertas

La carga muerta consiste en la carga que actúa de manera permanente sobre la superestructura del puente. La componen el peso propio de la losa, las vigas, los diafragmas, el barandal, la acera y la carpeta de rodadura, así como ductos de servicios públicos que pueda cargar la superestructura.

1.3. Análisis estructural de puentes

El análisis estructural de los puentes depende del tipo de puente que se esté analizando, ya que cada tipo de puente se comporta de manera diferente. Sin embargo el diseño de la superestructura se rige bajo los mismos principios, utilizando líneas de influencia para poder identificar la manera en que una carga móvil afecta a una viga mientras se mueve a lo largo de ella, pudiendo definir momentos máximos y mínimos y esfuerzos de corte máximos y mínimos según la posición del camión de carga. En este documento se analizará un puente de concreto reforzado simplemente apoyado.

1.3.1. Líneas de influencia

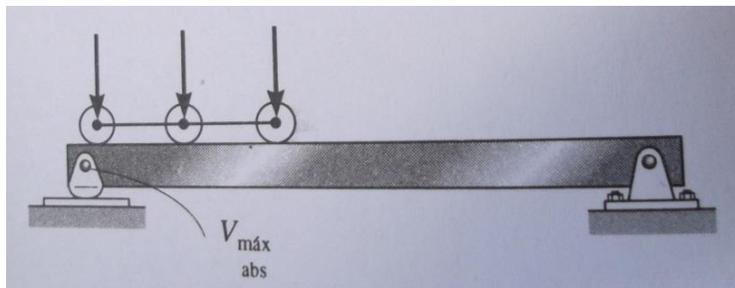
El método de líneas de influencia representa la variación de los esfuerzos de corte y momento y de la reacción en un punto específico cuando la carga se mueve sobre un elemento estructural.

Estos diagramas ayudan a conocer la posición donde una carga genera el máximo esfuerzo de corte y momento o deflexión en un punto específico. Además, la magnitud de la reacción, fuerza cortante, momento y deflexión asociada a ese punto puede calcularse a partir de las ordenadas del diagrama

de la línea de influencia, datos que son de gran importancia en el diseño de puentes.

Otro dato importante es conocer la posición del tren de carga sobre la viga de manera que este provoque la fuerza cortante y el momento máximos absolutos. Por medio del análisis con este método se concluye que la fuerza cortante máxima absoluta ocurrirá justamente al lado de uno de los soportes cuando el tren de cargas se coloque cerca del apoyo.

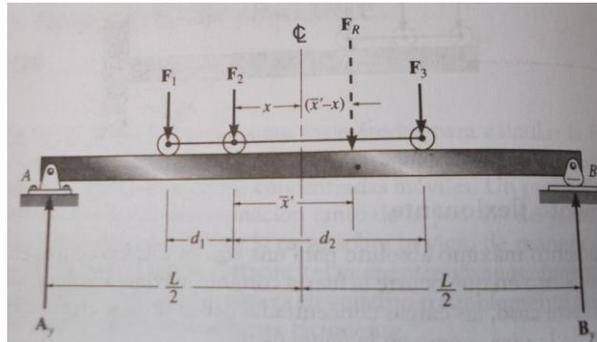
Figura 8. **Tren de carga y corte máximo**



Fuente: HIBBELER, Russell C. Análisis estructural. p.280.

Asimismo, por este método se concluye que para una viga simplemente apoyada con un tren de cargas puntuales móviles como se muestra en la figura 9 el momento máximo absoluto ocurre bajo la fuerza concentrada más pesada cuando esta fuerza se coloca sobre la viga de manera que ella y la fuerza resultante del sistema estén equidistantes del centro de la viga, (F_1 , F_2 , F_3 , F_R), este principio se debe aplicar a cada carga de la serie y calcularse el momento máximo correspondiente, y por comparación el momento máximo será el momento absoluto.

Figura 9. **Tren de carga y momento máximo**



Fuente: HIBBELER ,Russell C. Análisis estructural. p.281.

Por medio del método de líneas de influencia para varias cargas puntuales se puede calcular una envolvente de valores máximos. Esto se logra calculando la fuerza cortante y momentos máximos en la viga para cada punto, estos valores generan una envolvente de máximos cuando se grafican. De esta gráfica pueden encontrarse los valores máximos absolutos para la fuerza cortante y el momento, así como su localización.

1.4. **Tipo de fallas en vigas de puentes de concreto reforzado**

Los tipos de fallas en la superestructura en las vigas de concreto reforzado son pueden ser de los siguientes tipos:

- Grietas o cualquier desintegración del concreto en los extremos, especialmente en los apoyos.
- Grietas diagonales que se origina desde los apoyos hacia el centro del claro, indicando sobre esfuerzo debido a corte.

- Grietas verticales que se extienden hacia arriba desde la parte inferior de la viga cerca del centro del claro indican sobre esfuerzo por tensión.
- Aparición de escamas en las orillas de los apoyos pueden aparecer por causa de la presión en las orillas.

1.4.1. Métodos de diagnóstico y evaluación de estructuras

La evaluación de un puente se divide en 5 tipos según el nivel de detalle necesario de la evaluación, estos son:

- Inspección inicial
- Inspección de rutina
- Inspección de daños
- Inspección en profundidad (elementos sobre o bajo el nivel del agua)
- Inspección especial

Los métodos para la evaluación de la resistencia de puentes de concreto reforzado que se utilizan normalmente son los mismos que se utilizan para evaluar estructuras de concreto. Los métodos de ensayos no destructivos para evaluar la resistencia de puentes de concreto que se mencionan en el Manual para evaluación de condición de puentes (Manual for Condition Evaluation Bridges) de la AASHTO son los siguientes:

- Métodos para resistencia

Entre estos métodos está el ensayo con el martillo esclerométrico o martillo Schmidt, regido por la norma ASTM C 805. Es el ensayo más común y simple de este tipo, consiste en un émbolo que por medio de un resorte golpea el concreto midiendo la altura del rebote según la escala del martillo. Esta lectura da una indicación de la resistencia del concreto en donde se hizo el ensayo.

- Métodos de pulso sónico

Se refiere a métodos que utilizan la velocidad de pulsos de sonido, en el cual un martillo golpea la superficie creando un impulso, y se mide el tiempo que se tarda en llegar de un sensor a otro, ya que el tiempo está relacionado con el módulo de elasticidad y por lo tanto con la resistencia. Esta técnica solo es efectiva en áreas pequeñas. Tiene la ventaja de detectar diferencias entre áreas de concreto sano y no sano, y detectar delaminación y otras fracturas.

- Métodos de ultrasonido

Proporciona información estimada de la uniformidad, calidad, resistencia a compresión del concreto, también las discontinuidades internas como fisuras y agujeros pueden ser detectados. Este método funciona midiendo la velocidad de un pulso generado por un transductor eléctrico a través del concreto, que depende de la composición y madurez del concreto. La presencia de acero en el recorrido del pulso puede afectar la lectura, sin embargo con información del acero se pueden hacer ajustes necesarios.

La presencia de fisuras largas o agujeros grandes también pueden afectar la lectura, ya que aumentan el tiempo de recorrido del impulso. La resistencia a compresión puede ser medida después de calibrar el aparato con muestras de testigos del mismo concreto.

- Métodos magnéticos

En la evaluación de componentes de puentes éste método se utiliza principalmente para localizar la posición del refuerzo y su recubrimiento. No se utiliza para detectar deterioro o defectos directamente, pero al indicar el recubrimiento se asocia comúnmente con el deterioro por corrosión, pudiendo utilizarse para su control.

El aparato genera un campo magnético entre dos polos, y su intensidad es proporcional al cubo de la distancia entre los polos. El campo magnético se distorsiona al encontrar una barra de refuerzo y el grado de distorsión es en función del diámetro de la barra y la distancia desde el polo. Este método es confiable para lugares con poco refuerzo y para recubrimientos menores de 3 pulgadas.

- Métodos eléctricos

Estos métodos se basan en la diferencia de potencial y la resistencia eléctrica. La resistencia eléctrica se ha utilizado para medir la permeabilidad en sellos de losas de puentes, se basa en la resistencia eléctrica entre el acero de refuerzo y una esponja húmeda sobre la losa, lo norma la ASTM D3633.

El cambio de potencial eléctrico se utiliza para detectar posible corrosión en el acero de refuerzo. La lectura que da el aparato se interpreta según el rango siguiente:

- Lectura mayor a -0,20 Voltios indica 90 por ciento de probabilidad de no existir actividad de corrosión.
- Lectura entre -0,20 y -0,35 Voltios indica que la actividad de corrosión es dudosa.
- Lectura menor de -0,35 Voltios indica una probabilidad de 90 por ciento que existe actividad de corrosión.

Si la lectura es positiva, la lectura no es válida e indica que falta humedad en el concreto. Este método no indica el grado de corrosión en el acero de refuerzo.

- Métodos nucleares

Se utiliza principalmente para la medir la cantidad de humedad en el concreto endurecido. Se basa en el principio de que el agua disminuye la velocidad de los neutrones de acuerdo a la cantidad de hidrógeno producido en el espécimen de prueba. Esta medida se utiliza para determinar la probabilidad que ocurra corrosión en el acero de refuerzo.

- Termografía infrarroja

Es un método útil para detectar delaminación, cavidades y fallas en losas de puentes o elementos del puente expuestos a luz directa del sol. Se basa en el principio del calentamiento y enfriamiento del concreto y que es un pobre conductor del calor. La delaminación y otras discontinuidades interrumpen la

transmisión del calor que causa un incremento de calor en la superficie en relación al concreto circundante durante períodos de enfriamiento.

Estas variaciones de calor las detecta el equipo infrarrojo pudiendo identificar áreas con delaminación y la profundidad bajo la superficie. Está normado por la ASTM 4788.

- Radar

El radar para penetración del suelo ha sido utilizado para detectar deterioración en losas de puentes. El radar identifica discontinuidades como aire en el asfalto y en unión concreto-asfalto, o grietas en el concreto. Tiene la ventaja de poder medir el espesor del asfalto y de poder examinar la cara superior de vigas tipo cajón que de otra forma son inaccesibles, y puede detectar acero de refuerzo sin importar su profundidad.

1.4.2. Métodos de reparación

Existen muchos métodos de reparación de estructuras de concreto, y el método utilizado debe ser el adecuado para atacar el problema que causa el daño y no sus síntomas. Siempre es necesario hacer una adecuada evaluación de las deficiencias del concreto para determinar las causas reales de la falla y hacer una reparación exitosa en vez de reparar los síntomas. Solamente después de identificar las causas de la deficiencia se puede tomar una decisión racional del sistema de reparación y el método de implementación.

Para realizar la intervención se debe evaluar la condición del concreto, esto incluye la revisar los de documentos de diseño y planos de construcción, análisis estructural del estado actual de la estructura, realizar ensayos

destruictivos y no destruictivos y determinar los resultados, revisar los registros de mantenimiento y reparaciones anteriores. Un análisis correcto de toda esta información se debe realizar para determinar y entender las causas de la deficiencia del concreto.

La reparación de concreto se divide en reparaciones estructurales y no estructurales, protección y reforzamiento del concreto.

1.4.3. Métodos de reforzamiento

- Reparación estructural interna

La inyección con epóxico es utilizada en elementos fisurados donde se requiere recuperar la resistencia la sección fisurada a su estado no fisurado. La resistencia a tracción de la resina epóxica es mayor que la del concreto, por lo que la sección falla con las mismas cargas aplicadas con las que falló la sección no fisurada.

Se pueden inyectar fisuras tan delgadas de hasta 0,013 milímetros. La desventaja que tiene este método es que pierde resistencia cuando es expuesto a altas temperaturas, por lo que es necesario protegerlo contra el fuego. Algunas resinas son susceptibles al agua, por lo que es necesario tener en cuenta durante su aplicación en superficies posiblemente húmedas.

Figura 10. **Inyección de grieta con epóxico**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

- **Refuerzo externo**

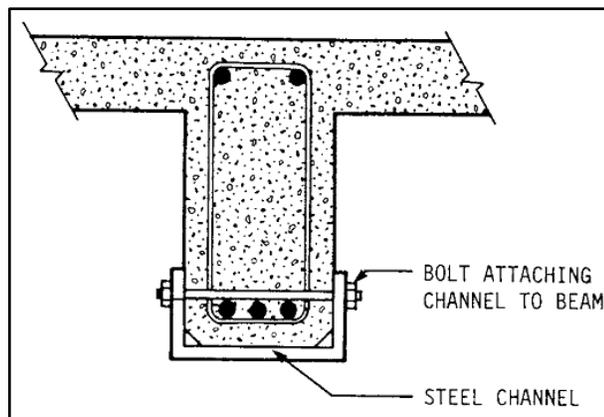
El refuerzo exterior consiste en colocar materiales como placas de acero, soportes de acero o concreto reforzado envolviendo el elemento estructural. Este refuerzo a flexión, corte y torsión debe ser recubierto con concreto, mortero, impermeabilizante, protección contra fuego o puede dejarse expuesto con un anticorrosivo aplicado. Este método es conveniente para reparar y reforzar donde haya acceso limitado para el equipo necesario para colocar refuerzo interior.

Cuando se utiliza adhesivo para colocar el refuerzo se requiere de una adecuada preparación de la superficie de concreto y del acero, se recomienda utilizar SandBlasting para limpiar las dos superficies, sin embargo, la limpieza por medios mecánicos o con agua a alta presión también es aceptable en muchos casos.

Las vigas pueden ser reforzadas a flexión y corte colocando barras longitudinales o estribos alrededor de los elementos y recubriéndolos con concreto. El concreto extra aumenta la sección del elemento, la resistencia y la rigidez, así como el peso, que debe ser considerado.

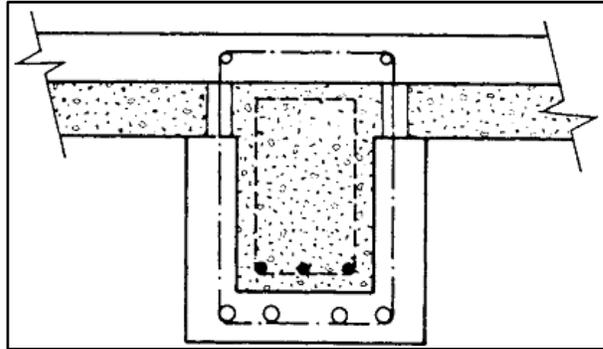
Debido a que la rigidez del elemento reforzado aumenta, la distribución de cargas cambia y debe ser analizado. Hay que considerar posibles sobre esfuerzos en la transición de elementos reparados a no reparados. Al aumentar la sección del elemento este ocupa espacio adicional que estaba disponible anteriormente.

Figura 11. **Refuerzo de viga con platina de acero**



Fuente: AASHTO, Bridge Engineering Construction and Maintenance. p. 6-16.

Figura 12. **Refuerzo con concreto y barras de acero**



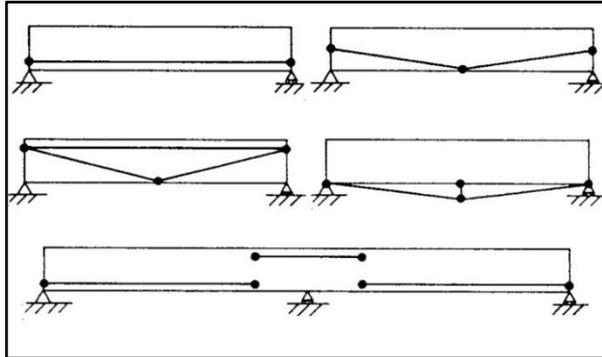
Fuente: Bridge Engineering Construction and Maintenance. p. 6-17.

- **Postensado externo**

Muchas estructuras pueden ser reforzadas para flexión y corte con la adición de tendones, varillas o pernos externos que están preesforzados. Los torones pueden estar rectos o deflectados según se ven las ilustraciones siguientes.

El uso del preesfuerzo reduce de manera efectiva la cantidad de refuerzo requerido para reparar la viga y también provee a la viga una curvatura convexa que ayuda a reducir la deflexión. El incremento de la resistencia a corte se incrementa debido a la compresión sobre el concreto y la configuración de los torones, y el incremento de la resistencia a flexión se debe a la adición de esfuerzos obtenidos por la fuerza de tensado.

Figura 13. **Configuraciones del tendón de postensado**



Fuente: Bridge Engineering: Construction and Maintenance. p. 6-26.

La figura 13 muestra las diferentes configuraciones del postensado, cada una induce una distribución diferente fuerzas y momentos. El diseño del refuerzo de postensado externo se hace con base en los mismos criterios de diseño de cualquier proyecto que utilice pretensado o postensado. Los anclajes deben ser diseñados y colocados apropiadamente con suficiente espacio para el equipo de tensado.

1.5. Refuerzo de fibra de carbono

A continuación se describe un poco de la historia del desarrollo de la fibra carbono, su aplicación en el campo de la construcción y su uso en Guatemala.

1.5.1. Historia

El uso de fibras de polímero reforzado (FRP, por sus siglas en inglés) empezó a utilizarse en un bote construido en la década de 1930 como parte de un experimento de manufactura utilizando tejido de fibra de vidrio y resina de

poliéster. En la década de 1940 se empezó a utilizar en la industria de la defensa, especialmente en aplicaciones aeroespaciales y navales aprovechando su alta relación peso-resistencia, resistencia a la corrosión debido al clima y ambiente salado. Rápidamente se expandió su utilización a la industria química, ya que probó ser resistente a presiones elevadas y en recipientes de gran diámetro, eliminando la necesidad de recubrimiento interior, protección exterior y protección catódica en tuberías hechas con FRP.

En la década de 1950, los compuestos FRP fueron utilizados en procesos químicos, papel, energía, tratamientos de desechos, refinamiento de metal y otras industrias. Este material ha sido utilizado para tanques de oxígeno que fueron empleados en el laboratorio Skylab que orbitó la tierra de 1973 a 1979, también es utilizado en la fabricación de autos de carreras de alto desempeño. En la década de 1960 la fuerza naval estadounidense y la fuerza naval británica desarrollaron barcos buscaminas a base de FRP, no solo por su resistencia superior en relación a otros materiales con el ambiente marino sino también, por ser no magnéticos.

Este material ha sido también utilizado para construir estructuras de aviones y barcos ya que reducen la señal de radar para no ser detectados, como en Caza F-117 y el bombardero B-2, y actualmente se utiliza en la industria espacial.

El refuerzo externo con FRP se empezó a utilizar para reforzar estructuras de concreto existentes alrededor del mundo desde mediados de la década de 1980, especialmente la fibra carbono de polímero Reforzado (CFRP). El refuerzo externo con sistemas CFRP se ha utilizado en vigas, columnas, losas, paredes, chimeneas, domos, túneles, silos, tuberías y armaduras, así como mampostería y acero.

El sistema de refuerzo externo con CFRP fue desarrollado como una alternativa al refuerzo externo con platinas de acero para incrementar resistencia a flexión, sistema que ha sido utilizado en muchos puentes y edificios alrededor del mundo. Debido a que el acero es susceptible al óxido y corrosión, deteriorando la adherencia entre el acero y el concreto, y su instalación es difícil pues requiere maquinaria pesada, el refuerzo externo con CFRP se ha visto como una gran alternativa al acero.

Trabajos experimentales utilizando CFRP para refuerzo de estructuras de concreto fueron reportados en 1978 en Alemania, e investigación en Suiza llevó a las primeras aplicaciones para refuerzo a flexión en puentes de concreto reforzado utilizando refuerzo externo con sistemas CFRP. En otros elementos estructurales como columnas de concreto reforzado el sistema de refuerzo externo FRP fue utilizado por primera vez en Japón en la década de 1980 para proporcionar confinamiento adicional.

Los Estados Unidos ha tenido interés por refuerzo a base de fibras para estructuras de concreto desde la década de 1930, pero no fue sino hasta la década de 1980 a través de iniciativas de la Fundación Nacional de Ciencia (NSF) y la Federación Nacional de Carreteras (FHWA) que se inició el desarrollo e investigación de estos métodos de refuerzo.

El desarrollo de códigos y estándares para sistemas de refuerzo externo con FRP está activo en Europa, Japón, Canadá y los Estados Unidos en instituciones como la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE), el Instituto del Concreto de Japón (JCI), el Instituto Técnico de Ferrocarriles (RTRI), Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles, Federación Internacional para Concreto Estructural de Suiza, Consejo Nacional Italiano de investigación, Asociación Canadiense de Estándares y el Instituto Americano del Concreto

(ACI) que han publicado varios documentos relacionados con el uso de materiales CFRP en estructuras de concreto.

1.5.2. Aplicación de fibra de carbono en estructuras de concreto reforzado

El Código que se utiliza como referencia para realizar este documento es el ACI 440.2R-08 Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP externamente adherido para refuerzo de estructuras de concreto, publicado por el Instituto Americano del Concreto (ACI), el cual provee una guía para la selección, diseño e instalación de los sistemas FRP de adherencia externa para refuerzo de estructuras de concreto.

Las fibras de carbono de polímero reforzadas (CFRP) surgieron como una alternativa a los materiales tradicionales para reparación y rehabilitación como placas de acero adheridas externamente, postensado externo, aumento de la sección del elemento estructural y confinamiento con placas de acero.

Este material tiene ciertas ventajas sobre los otros debido a su alto módulo de elasticidad, su relativo poco espesor, que lo hace a menudo deseable cuando la estética y acceso son consideraciones importantes, también puede ser colocado en lugares donde las técnicas tradicionales son más difíciles de aplicar, la mano de obra no especializada y fácil colocación.

1.5.2.1. Consideraciones

El refuerzo con sistemas FRP es bastante efectivo para refuerzos de elementos a flexión y corte. También provee confinamiento adicional, sin

embargo para otros tipos de fallas como corte por punzonamiento y capacidad de soporte de zapatas este sistema no es adecuado.

Los sistemas CFRP pueden ser utilizados para rehabilitar o restaurar la resistencia de un elemento estructural, adaptar o reforzar por completo un elemento estructural para resistir incrementos de cargas debido a cambios de uso de la estructura, o correcciones de errores de diseño o errores de construcción. Para evaluar el sistema CFRP a utilizar se deben hacer varias pruebas para asegurarse que la estructura donde se pretende utilizar cumple con los requisitos necesarios, como mínimo se debe evaluar lo siguiente de una estructura de concreto:

- Dimensiones existentes del elemento estructural.
- Ubicación, tamaño y causa de fisuras y astillas, fisuras mayores a 0,3 milímetros de ancho deben ser inyectadas con epóxico ya que pueden afectar el desempeño del sistema CFRP.
- Ubicación y cantidad de corrosión en el acero de refuerzo, el cual debe ser reparado antes de aplicar el sistema CFRP.
- Presencia de corrosión activa, ya que este sistema no detiene la corrosión.
- Cantidad y ubicación de acero de refuerzo existente.
- Resistencia a compresión del concreto del elemento estructural in situ, el f'_c debe ser mayor de 17,5 mega pascales (2 500 libras sobre pulgada cuadrada).
- Integridad del concreto, especialmente del concreto de recubrimiento, en todas las áreas donde el sistema FRP será adherido al concreto.
- Ambiente al que será expuesto, temperatura ambiente, exposición al fuego, protección contra vandalismo.

1.5.2.2. Filosofía de diseño

La filosofía de diseño de sistemas CFRP indica que la pérdida de refuerzo CFRP no debe causar la falla del elemento estructural bajo la carga de servicio. Para lograr esto las recomendaciones de diseño se basan en principios de estados límites. Esto establece niveles de seguridad aceptables para la ocurrencia de estados límites de servicio (deflexión excesiva y fisuras) y de estados últimos (falla y fatiga) teniendo que evaluar siempre la resistencia del elemento, posibles modos de falla y los esfuerzos en los materiales. Estos sistemas deben ser diseñados de acuerdo a los requerimientos de resistencia y servicio utilizando factores de carga y esfuerzo del código ACI 318-08 y factores adicionales que reflejan la incertidumbre inherente de los sistemas CFRP comparados con el acero de refuerzo.

Estos límites son puestos para prevenir el colapso de la estructura si el sistema CFRP falla debido a daño por cualquier causa. La premisa básica para su utilización dice que el elemento estructural no reforzado con CFRP debe tener la suficiente resistencia para cierto nivel de carga. En el caso que el sistema CFRP fuera dañado, la estructura será capaz de resistir un nivel de carga razonable sin colapsar. La resistencia existente de la estructura debe ser suficiente para resistir la carga descrita en la ecuación:

$$\phi R_n \geq 1,1S_{DL} + 0,75S_{LL}$$

Donde:

R_n = resistencia nominal existente del elemento estructura

S_{DL} = efectos de carga muerta nueva

S_{LL} = efectos de carga viva nueva

Esta condición mínima permitirá al elemento estructural mantener la suficiente capacidad estructural hasta que el refuerzo CFRP sea reparado.

1.5.2.3. Refuerzo a flexión

El refuerzo a flexión de CFRP se debe adherir en la cara a tensión del elemento estructural de concreto con las fibras orientadas a lo largo del elemento, esto provee un incremento en la resistencia a flexión. Tomando en cuenta los límites anteriormente descritos el aumento de resistencia es un 40 por ciento.

El diseño del refuerzo a flexión requiere que se cumpla la siguiente ecuación $\phi M_n \geq M_u$ donde ϕM_n se refiere al esfuerzo nominal del elemento multiplicado por un factor de reducción ϕ , y M_u se refiere al momento calculado con las cargas factoradas como momentos de carga viva más carga muerta, calculados utilizando factores de reducción de carga del código ACI 318-08. Adicionalmente se utiliza otro factor de reducción, Ψ_f , el cual debe ser aplicado al refuerzo CFRP para mejorar la confiabilidad de la predicción del refuerzo considerando los diferentes tipo de falla observados para el refuerzo con FRP.

1.5.2.4. Propiedades de los materiales

Las propiedades del material de refuerzo CFRP utilizadas son las reportadas por el fabricante, sabiendo que no toman en cuenta exposición prolongada a diferentes condiciones ambientales a las que se expone el refuerzo CFRP, que pueden reducir las propiedades a tensión y el flujo plástico y resistencia a fatiga de los materiales CFRP, por lo que las propiedades de los materiales deben ser reducidas con base en el tipo de exposición del ambiente para ser utilizados como condiciones iniciales.

Las siguientes ecuaciones deben ser utilizadas para calcular las propiedades de los materiales junto con los factores de la tabla anterior según el tipo de fibra el tipo y de exposición ambiental.

- Resistencia última de diseño a tensión

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

Donde:

f_{fu} = resistencia última de diseño a tensión

C_E = coeficiente de reducción ambiental

f_{fu}^* = resistencia última del material CFRP según fabricante

- Deformación unitaria de ruptura de diseño

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

Donde:

ε_{fu} = deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP

C_E = coeficiente de reducción ambiental

ε_{fu}^* = deformación última de ruptura del refuerzo CFRP

Debido a la elasticidad lineal los materiales CFRP hasta la falla, el módulo de elasticidad de diseño para refuerzo CFRP unidireccional puede ser determinado por la ley de Hook, ya que no es afectado por las condiciones ambientales de exposición, por lo que será el mismo que da el fabricante. La ecuación que lo define es

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}}$$

Donde:

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

f_{fu} = resistencia última de diseño a tensión

ε_{fu} = deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP

Tabla II. Factores de reducción ambiental

Condiciones de exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción ambiental C_E
Exposición en interiores	Carbono	0,95
Exposición exterior (puentes, pilas y estacionamientos no cerrados)	Carbono	0,85
Ambiente agresivo (plantas químicas y plantas de tratamientos de aguas)	Carbono	0,85

Fuente: ACI 440.2R-08. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.24.

1.5.2.5. Modos de falla del refuerzo CFRP

Debido a que la resistencia a flexión de una sección depende del control del modo de falla, es importante saber cómo puede fallar el refuerzo FRP, a continuación se enumera cada uno:

- Aplastamiento del concreto en compresión antes de que fluya el acero de refuerzo.
- Fluencia del acero en tensión seguido de la ruptura de la platina de refuerzo FRP.
- Fluencia del acero en tensión seguido por aplastamiento del concreto.
- Delaminación del recubrimiento de concreto debido a corte o tensión.
- Pérdida de adherencia del refuerzo FRP con el substrato del concreto.

El aplastamiento del concreto se asume que ocurre cuando el esfuerzo a compresión alcanza la deformación unitaria máxima utilizable ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,003$). La ruptura del refuerzo CFRP externamente adherido es asumido que ocurre si la deformación unitaria del CFRP alcanza la deformación unitaria de ruptura de diseño ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$) antes que el concreto alcance su deformación unitaria máxima utilizable. La delaminación del recubrimiento puede ocurrir si la fuerza del CFRP no puede ser soportada por el concreto. Este comportamiento también se conoce como pérdida de adherencia, sin tener en cuenta el plano donde la falla se propaga en la región CFRP-adhesivo-substrato, según se ve en la figura 14.

Lejos de la sección donde el refuerzo CFRP externamente adherido termina, el modo de falla gobernante debe ser pérdida de adherencia, figura 14 (b). Para prevenir una falla por despegue debido a una fisura inducida intermedia, la deformación unitaria efectiva en el refuerzo FRP deber ser limitada al nivel de deformación unitaria en que la pérdida de adherencia del refuerzo CFRP debe ocurrir, ε_{fd} , según de lo define la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu} \text{ , unidades SI}$$

Donde:

ε_{fa} = deformación unitaria por pérdida de adherencia del refuerzo CFRP

f'_c = resistencia a compresión del concreto

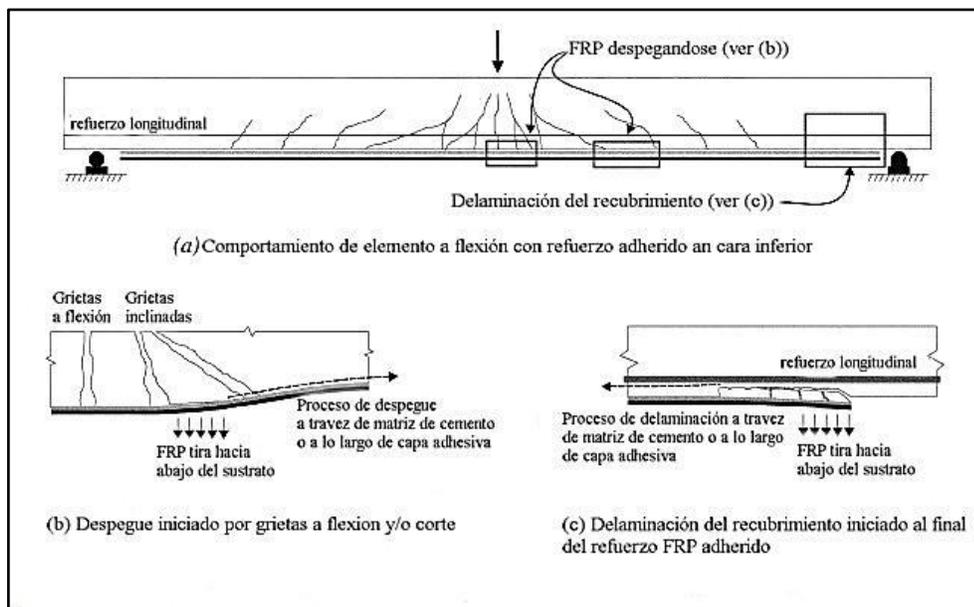
n = número de capas del refuerzo CFRP

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

t_f = espesor nominal de una capa de refuerzo CFRP

ε_{fu} = deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP

Figura 14. Pérdida de adherencia y delaminación



Fuente: ACI 440.2R-08. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.25.

1.5.2.6. Principios de diseño con refuerzo CFRP externamente adherido

Para calcular la resistencia a flexión de una sección reforzada con refuerzo CFRP adherido externamente se hacen las siguientes suposiciones:

- Los cálculos de diseño están basados en las dimensiones, distribución del acero de refuerzo interno, y propiedades del material del elemento estructural existente que se desea reforzar.
- Las deformaciones en el acero de refuerzo y el concreto son directamente proporcionales a la distancia desde el eje neutro. Esto significa que una sección plana antes de soportar carga se mantiene plana después de ser cargada.
- No existe deslizamiento relativo entre el refuerzo CFRP externo y el concreto.
- La deformación unitaria por corte en la capa adhesiva no se considera debido a que la capa adhesiva es muy delgada y tiene poca variación en su espesor.
- La deformación unitaria máxima utilizable del concreto sometido a compresión es 0,003.
- La resistencia a tensión del concreto no es considerada.
- La relación esfuerzo-deformación hacia la falla del refuerzo CFRP es linealmente elástica.

Mientras que algunas de las suposiciones ayudan al cálculo, no reflejan el comportamiento verdadero del refuerzo CFRP a flexión. Sin embargo, esta inexactitud de las suposiciones no afectará los cálculos de la resistencia a flexión de un elemento reforzado con CFRP. Hay que tener en mente que

cuando se refuerza a flexión un elemento, este deber ser capaz de resistir los esfuerzos de corte asociados con el aumento de resistencia a flexión.

Es importante determinar el nivel de la deformación unitaria del refuerzo CFRP en su estado el límite último. Debido a que la deformación del material CFRP es lineal elástico hasta su falla, el grado de deformación unitaria en el refuerzo CFRP determina el nivel de esfuerzo que puede desarrollar el refuerzo CFRP. La deformación unitaria máxima que logrará el refuerzo CFRP es determinada, ya sea por el grado de deformación del refuerzo CFRP al momento que el concreto falle por aplastamiento, el punto donde el refuerzo CFRP se rompe o el punto donde el refuerzo CFRP pierde adherencia con el concreto.

La deformación efectiva del refuerzo CFRP en su estado límite último se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_u \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

Donde:

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla

ε_u = deformación unitaria del concreto

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

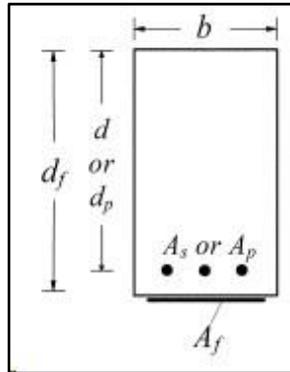
c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

ε_{fd} = deformación del refuerzo CFRP en falla por falta de adherencia

La figura 15 muestra la ubicación de la altura efectiva del refuerzo CFRP, d_f

Figura 15. **Altura efectiva para refuerzo CFRP**



Fuente: ACI 440.2R-08. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.27.

La deformación máxima que puede tener el refuerzo CFRP, antes que la sección falle por flexión se obtiene por la siguiente ecuación:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

Donde:

f_{fe} = esfuerzo efectivo en el refuerzo CFRP alcanzado en la sección al momento de la falla

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

ε_{fe} = deformación efectiva en el refuerzo CFRP alcanzado al momento de falla

Hay que recordar que el uso de refuerzo CFRP externamente adherido para refuerzo a flexión reduce la ductilidad original del elemento estructural, lo cual puede ser ignorado en algunos casos. Sin embargo en casos que la pérdida de ductilidad sea considerable ésta debe ser considerada.

Para elementos de concreto reforzado una ductilidad adecuada es alcanzada si la deformación unitaria del acero en el punto que el concreto falla por aplastamiento, o falla el refuerzo CFRP, incluyendo delaminación o pérdida de adherencia, es por lo menos 0,005 según la definición de una sección controlada por tensión de acuerdo al ACI 318-08, pues se basa en esa filosofía, por lo que se debe utilizar el factor de reducción ϕ que se define en la siguiente ecuación:

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 + \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

Donde:

ϕ = factor de reducción de resistencia según ACI 318-08

ε_t = deformación unitaria del acero en tensión

ε_{sy} = deformación unitaria del acero correspondiente al punto fluencia

Esta ecuación fija el factor de reducción en 0,90 para secciones dúctiles, 0,65 para secciones frágiles donde el acero no fluye y provee una transición lineal para el factor de reducción entre los dos extremos, como se ve en la figura 16.

Para evitar deformaciones inelásticas en el concreto reforzado con refuerzo externo CFRP, se debe evitar que el acero interno de refuerzo fluya bajo las cargas de servicio, especialmente en elementos expuestos a cargas cíclicas. El esfuerzo en el acero debe ser limitado al 80 por ciento de su resistencia a la fluencia según la ecuación:

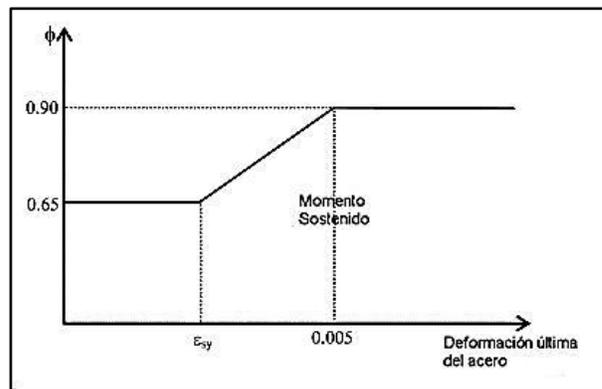
$$f_{s,s} \leq 0,80f_y$$

Donde:

$f_{s,s}$ = esfuerzo en acero de refuerzo con cargas de servicio

f_y = esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

Figura 16. **Representación gráfica del factor de reducción**



Fuente: ACI 440.2R-08. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.27.

Y el esfuerzo a compresión del concreto debe estar limitado al 45 por ciento de su resistencia a la compresión según la ecuación:

$$f_{c,s} \leq 0,45f'_c.$$

Donde:

$f_{c,s}$ = esfuerzo de compresión del concreto en condición de servicio

f'_c = resistencia a compresión del concreto

Este tipo de material está sujeto a falla por flujo plástico, por lo que se debe revisar el nivel de esfuerzos en el refuerzo CFRP cuando está sujeto a esfuerzos constantes o bajo esfuerzos cíclicos. Según investigaciones se ha determinado que la fibra de carbono resiste aproximadamente 0,9 veces su resistencia última antes tener un problema de falla por flujo plástico.

Para evitar este tipo de falla se debe evaluar por medio de un análisis elástico con un momento aplicando debido a todas las cargas sostenidas (cargas muertas y la parte sostenida de la carga viva) más el momento máximo inducido en un ciclo de carga de fatiga, como se muestra en la figura 17.

El esfuerzo sostenido para mantener el nivel de seguridad debe ser limitado según la ecuación:

$$f_{f,s} < \text{momento sostenido más esfuerzo límite cíclico}$$

Donde:

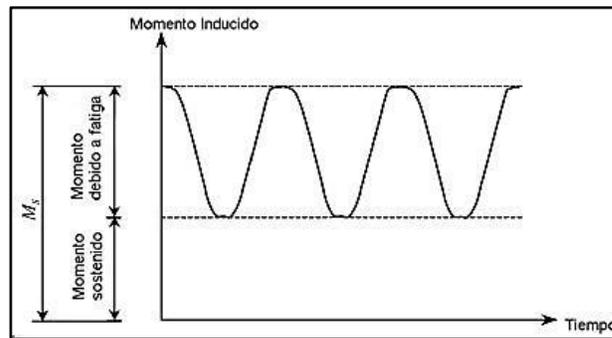
$f_{f,s}$ = esfuerzo en refuerzo CFRP por el momento dentro del rango elástico.

Para ilustrar todos los conceptos anteriormente mencionados, se describe a continuación su aplicación en una sección rectangular simplemente reforzada, la siguiente figura ilustra la deformación unitaria interna bajo flexión en el estado límite último.

El proceso de cálculo utilizado para llegar a la resistencia última debe satisfacer la compatibilidad entre la deformación unitaria y la fuerza de equilibrio y debe considerar el modo gobernante de falla. Este método requiere varias

iteraciones para satisfacer esta condición, por lo que es un método de prueba y error.

Figura 17. **Nivel de momento aplicado que debe ser utilizado para verificar límites de esfuerzos en el refuerzo CFRP**



Fuente: ACI 440.2R-08. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.27.

La tabla III muestra el valor del momento sostenido más esfuerzo límite cíclico

Tabla III. **Momento sostenido más esfuerzos límites de cargas cíclicas de servicio**

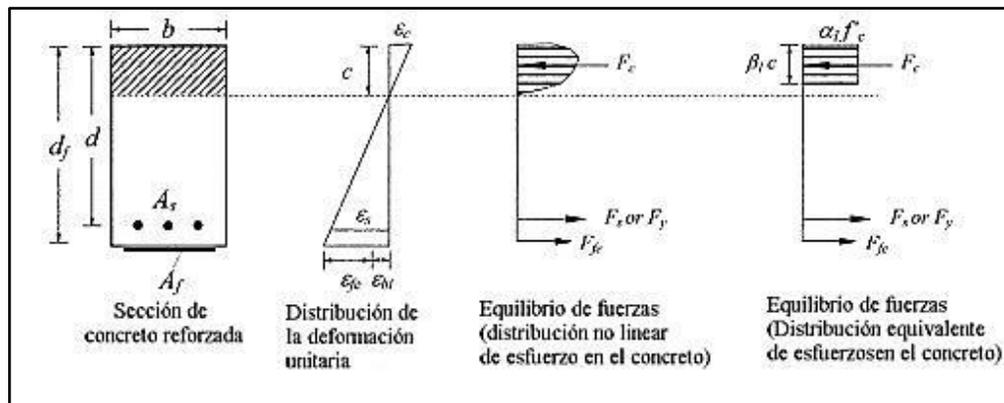
Tipo de esfuerzo	CFRP
Momento sostenido más límite de esfuerzo cíclico	$0,55f_{fu}$

Fuente: ACI 440.2R-08. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.28.

Donde:

f_{fu} = esfuerzo de diseño último a tensión del refuerzo CFRP

Figura 18. **Distribución interna de deformación unitaria y esfuerzos para una sección rectangular bajo flexión en el estado límite último**



Fuente: ACI 440.2R-08. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.28.

El método se describe a continuación:

- Elegir una profundidad inicial asumida del eje neutro c , ya que en base a esto se harán los cálculos de deformación y esfuerzos.
- Calcular el nivel de deformación en cada material utilizando compatibilidad de deformaciones unitarias.

La deformación del refuerzo CFRP se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_u \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

Donde:

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla

ε_u = deformación unitaria del concreto

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

ε_{fd} = deformación del refuerzo CFRP en falla por falta de adherencia

Esta ecuación considera el modo de falla gobernante para la profundidad asumida del eje neutro. Si el lado izquierdo de la desigualdad controla, significa que la falla por aplastamiento del concreto gobierna la falla a flexión de la sección. Si el lado derecho de la desigualdad controla, la falla del CFRP (ruptura o pérdida de adherencia) gobierna la falla a flexión de la sección.

La deformación unitaria del acero se determina basándose en la deformación unitaria del refuerzo CFRP utilizando compatibilidad de deformaciones con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

Donde:

ε_s = deformación del acero de refuerzo

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP
 d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión
 d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo
 c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

- Calcular el nivel de esfuerzo asociado en cada material.

El esfuerzo efectivo en el refuerzo CFRP se calcula utilizando la deformación unitaria del refuerzo CFRP, asumiendo un comportamiento perfectamente elástico, con la ecuación:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

Donde:

f_{fe} = esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP

El esfuerzo en el acero se determina con la deformación del acero utilizando la curva esfuerzo-deformación, con la ecuación:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

Donde:

f_s = esfuerzo del acero de refuerzo

E_s = módulo de elasticidad a tensión del acero de refuerzo

ε_s = deformación del acero de refuerzo

f_y = esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

- Una vez determinados el esfuerzo y la deformación unitaria en el refuerzo CFRP y en el acero de refuerzo para la profundidad asumida del eje neutro, el equilibrio de fuerzas internas se revisa utilizando la siguiente ecuación:

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$$

Donde:

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

A_s = área de acero de refuerzo

f_s = esfuerzo del acero de refuerzo

A_f = área de refuerzo CFRP

f_{fe} = esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla

α_1 = factor del f'_c para calcular intensidad del rectángulo equivalente de esfuerzos de concreto.

f'_c = resistencia a compresión del concreto

β_1 = proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos y la profundidad del eje neutro.

b = ancho de la cara a compresión del elemento

Los términos α_1 y β_1 son parámetros que definen un bloque rectangular de esfuerzos en el concreto equivalente a una distribución no lineal de esfuerzos. Si el modo de falla que gobierna es el aplastamiento del concreto, antes o después que el acero fluya, α_1 y β_1 pueden ser tomados como $\alpha_1 = 0,85$ y β_1 según la sección 10.2.7.3 del ACI 318-08 que dice que “Para f'_c entre 18 y 30 mega pascales, β_1 debe ser tomado como 0,85. Para f'_c superior a 4 000 libras

sobre pulgada cuadrada, β_1 se debe reducir en forma lineal a razón de 0,05 por cada 1 000 libras sobre pulgada cuadrada de aumento sobre 30 mega pascales, pero β_1 no debe ser tomado menor a 0,65.” Sin embargo, métodos que consideran una distribución no lineal de esfuerzos en el concreto también pueden ser utilizados.

La profundidad del eje neutro se encuentra al satisfacer de manera simultánea las cinco ecuaciones anteriores, esto establece un equilibrio interno de fuerzas y una compatibilidad de deformaciones unitarias. Para resolver la profundidad asumida del eje neutro, c , debe de coincidir con la profundidad del eje neutro calculada. Si coinciden los dos valores del eje neutro la profundidad correcta ha sido alcanzada, si no coinciden se asume otro valor de profundidad de eje neutro y se repiten estos pasos hasta que el valor de la profundidad de eje neutro asumida coincida con la profundidad del eje neutro calculada.

- Una vez encontrado la profundidad del eje neutro, c , se procede a calcular la resistencia nominal a flexión de la sección reforzada externamente con CFRP utilizando la ecuación:

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

Donde:

M_n = resistencia nominal a flexión

A_s = área de acero de refuerzo

f_s = esfuerzo del acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

- c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro
- β_1 = proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente
- ψ_f = factor de reducción de resistencia del refuerzo CFRP para flexión
- A_f = área del refuerzo CFRP
- f_{fe} = esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla
- h = altura o ancho del elemento

El factor adicional, ψ_f , es aplicado a la contribución de resistencia a flexión del refuerzo FRP con un valor recomendado de 0,85. Este factor se aplica para reflejar incertezas inherentes en los sistemas CFRP comparados con el acero de refuerzo y el concreto preesforzado. Este factor fue calculado en base a evaluaciones estadísticas de variabilidad en las propiedades mecánicas, predicciones en ensayos a escala natural y aplicaciones en campo. Este factor está dado para dar un índice de seguridad mayor de 3,5.

- Calcular el esfuerzo en el acero de refuerzo bajo las cargas de servicio. Este esfuerzo se calcula basado en el análisis de una sección fisurada de la sección de concreto reforzada con refuerzo CFRP utilizando la ecuación:

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) (d_f - kd)}$$

Donde:

- $f_{s,s}$ = esfuerzo en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio
- M_s = momento de servicio de la sección
- ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

A_f = área de refuerzo CFRP

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

k = proporción entre la profundidad del eje neutro y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.

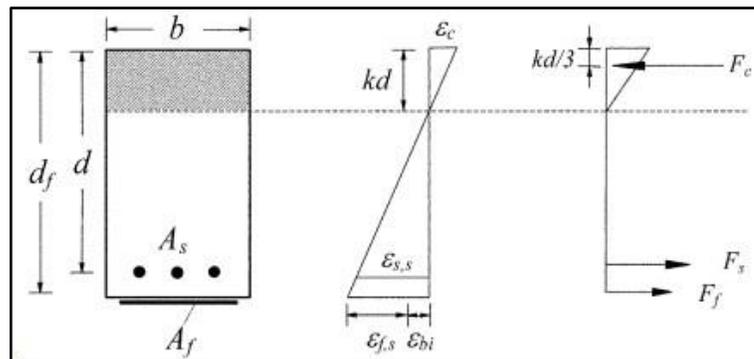
d = distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

E_s = módulo de elasticidad del acero de refuerzo

A_s = área de acero de refuerzo

Que debe cumplir con el esfuerzo máximo según la ecuación $f_{s,s} \leq 0,80f_y$, que fue mencionada anteriormente. M_s es igual al momento de todas las cargas aplicadas (carga muerta y la porción de carga viva sostenida) más el momento máximo inducido en un ciclo de carga de fatiga, como se mencionó anteriormente.

Figura 19. **Distribución elástica de deformación unitaria y esfuerzos**



Fuente: ACI 440.2R-08, Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p.28.

- Cálculo del esfuerzo en CFRP debido a cargas de servicio. Este esfuerzo se calcula utilizando la ecuación:

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \frac{d_f - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f$$

Donde:

$f_{f,s}$ = esfuerzo en el refuerzo CFRP dentro del rango elástico

$f_{s,s}$ = esfuerzo en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

E_s = módulo de elasticidad del acero de refuerzo

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

k = proporción entre la profundidad del eje neutro y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.

d = distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

Esta ecuación da el esfuerzo en el refuerzo CFRP bajo un momento aplicado dentro del rango de respuesta elástica del elemento estructural. Este esfuerzo debe cumplir con el límite impuesto por la ecuación:

$$f_{f,s} < \text{momento sostenido más esfuerzo límite cíclico}$$

Donde:

$f_{f,s}$ = esfuerzo en refuerzo CFRP dentro del rango elástico

Este método es el que describe el código ACI 440.2R-08 para diseño con refuerzo CFRP, el cual se utilizará más adelante en este documento.

1.5.3. Utilización de fibra de carbono en Guatemala

En Guatemala, el refuerzo CFRP de fibra de carbono se empezó a utilizar en el 2002, especialmente para refuerzo de elementos estructurales de edificios, como losas y vigas.

El uso de este tipo de refuerzo en puentes ha sido poco, sin embargo se ha visto la funcionalidad y efectividad de este tipo de refuerzo. Los puentes donde se ha utilizado el refuerzo FRP de fibra de carbono para reparar o reforzar son:

- Paso a desnivel de Ciudad San Cristóbal, Mixco, Guatemala.

Se reparó un martillo de una pila del paso a desnivel, ya que aparecieron grietas debidas a falla por esfuerzo de corte, la cual se reparó utilizando fibra de carbono.

- Puentes Anillo Periférico-Calzada Aguilar Batres, Anillo Periférico-Calzada Roosevelt, ciudad de Guatemala, y Anillo Periférico- Calzada San Juan 2009.

Una viga del puente falló a corte debido a sobre carga, ya que la carga actual excedió la carga para la cual fue diseñada. Se utilizó fibra de carbono para envolver la viga a fin de proporcionar el refuerzo a corte necesario.

- Puente La Ruedita, zona 1- Anillo Periférico norte, 2011.

Se colocó refuerzo a flexión y corte en 10 vigas después de ser reparadas, pues presentaban daños debido a golpes de camiones que debilitaron la estructura. Con esto se aumentó la capacidad de carga del puente.

2. DISEÑO DE VIGA DE CONCRETO REFORZADO PARA CAMIONES HS-15 Y HS-20

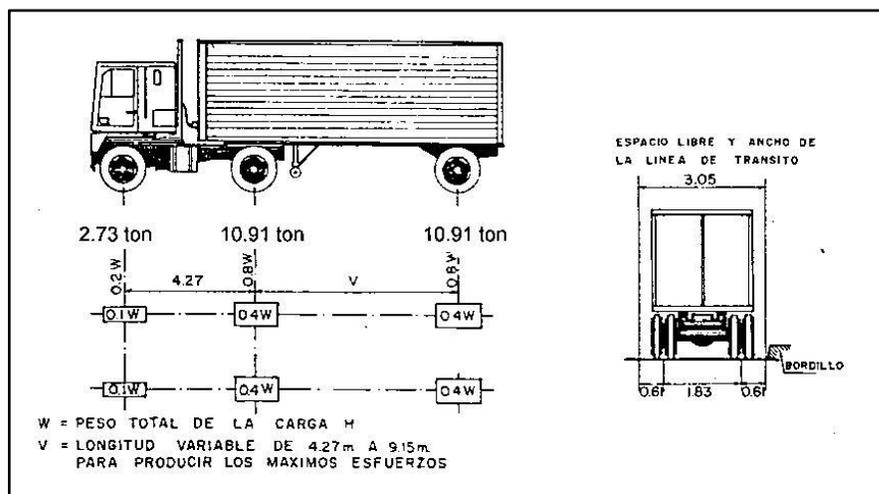
2.1. Diseño de viga bajo camión de carga HS-15

A continuación se desarrolla el diseño con de la viga para camión de carga HS-15, para después evaluar y determinar la cantidad de refuerzo necesario para su reforzamiento.

2.1.1. Consideraciones de diseño

El camión de carga a utilizar para el diseño es el HS-15, que tiene las características mostradas en la figura 7, reproducida aquí para comodidad.

Figura 20. Camión de carga HS-15



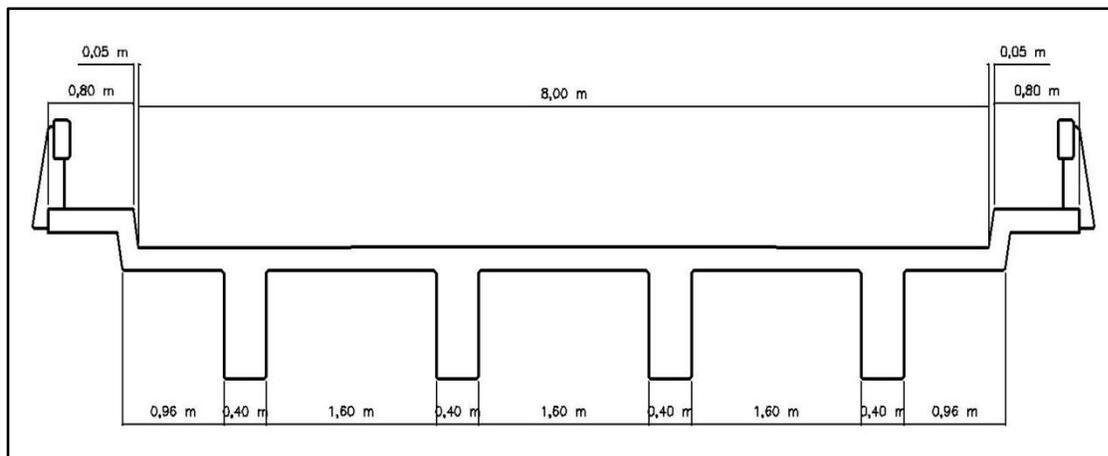
Fuente: BARRERA, Jerónimo H, Puentes. p.26.

2.1.2. Predimensionamiento de la viga

Para predimensionar la superestructura se consideran las características de acuerdo a los puentes típicos construidos en Guatemala, estas son:

- Ancho de losa = 8,00 metros
- Ancho de aceras = 0,80 metros
- Cantidad de vigas = 4,00
- Separación entre vigas a ejes = 2,00 metros
- Espesor de losa = 0,18 metros
- Ancho de viga = 0,40 metros
- Altura de viga = 1,03 metros
- Espesor de asfalto = 0,05 metros
- Luz del puente = 20,00 metros

Figura 21. Sección de superestructura



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2012.

2.1.3. Memoria de cálculo

Las vigas se diseñarán como vigas T, para esto se toma el criterio según AASHTO que dice:

$$b \leq \frac{L}{4}$$

$$b \leq 12h_f + b_w$$

$$b \leq s + b_w$$

Donde:

b = ancho efectivo de ala

h_f = espesor de la losa

b_w = ancho del alma

Calculando con esta información se obtiene:

$$b \leq \frac{20 \text{ m}}{4} = 5,00 \text{ m}$$

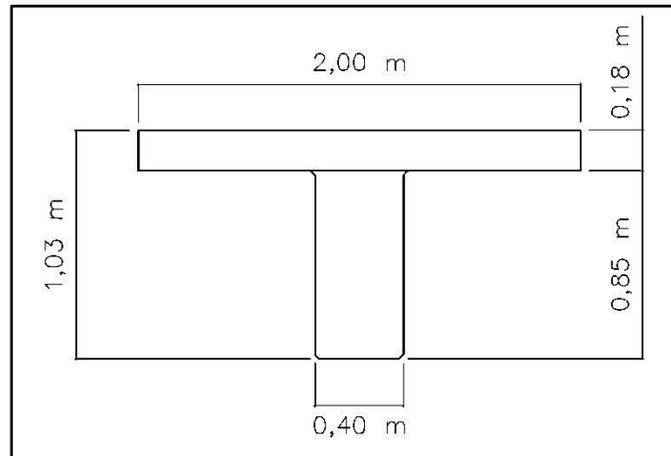
$$b \leq 12(0,18 \text{ m}) + 0,40 \text{ m} = 2,56 \text{ m}$$

$$b \leq 1,6 \text{ m} + 0,40 \text{ m} = 2,00 \text{ m}$$

Por lo tanto, el valor que rige es el más bajo, $b= 2,00$ metros, quedando la sección de la viga con estas dimensiones:

Ya con la sección definida, mostrada en la figura 22, se procede a diseñar la viga con el siguiente procedimiento:

Figura 22. Sección de viga T



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2012.

- Determinación de la carga muerta

$$w_{losa} = (0,18 \text{ m})(2,00 \text{ m})(2,40 \text{ ton/m}^3) = 0,86 \text{ ton/m}^3$$

$$w_{viga} = (0,40 \text{ m})(0,85 \text{ m})(2,40 \text{ ton/m}^3) = 0,812 \text{ ton/m}^3$$

$$w_{rodadura} = (0,05 \text{ m})(2,00 \text{ m})(2,20 \text{ ton/m}^3) = 0,22 \text{ ton/m}^3$$

$$w_{total} = w_{losa} + w_{viga} + w_{rodadura}$$

Donde:

w_{losa} = peso de la losa

w_{viga} = peso de la viga

$w_{rodadura}$ = peso de la carpeta de rodadura

w_{total} = peso total

$w_{diafragma}$ = peso del diafragma

$$w_{total} = 1,90 \text{ ton/m}$$

$$w_{diafragma} = \frac{3}{4} (0,85 \text{ m})(0,30 \text{ m})(1,60 \text{ m})(2,40 \text{ ton/m}^3)$$

$$w_{diafragma} = 0,73 \text{ ton/m}$$

- Determinación de la carga viva

Al momento de calcular la carga viva se deben calcular y aplicar el factor de impacto y el factor de distribución que especifica AASHTO.

- Factor de impacto: este factor toma en cuenta la fuerza del golpe de las ruedas sobre el puente al momento de ingresar el vehículo, está dado por la formula

$$FI = 1 + \frac{15}{L + 38}$$

Donde:

FI = factor de impacto

L = longitud de la viga

$$FI = 1 + \frac{15}{20 + 38}$$

$$FI = 1,26$$

- Factor de distribución: indica qué porcentaje del peso de cada rueda está actuando sobre la viga, está dado según el tipo de vigas, longitud del puente y cantidad de carriles y separación entre vigas.

La tabla 3.23.1 Distribution of Wheel Loads in Longitudinal Beams, de la AASHTO 2002, indica las ecuaciones para calcular este factor, a continuación se reproduce la sección de la tabla relacionada con vigas T.

Tabla IV. **Factor de distribución de rueda para vigas**

Tipo de losa	Puente diseñado para una línea de tránsito	Puente diseñado para dos o más líneas de tránsito
Concreto Vigas T	$\frac{S}{1,98}, S \leq 1,80 \text{ m}$	$\frac{S}{1,83}, S \leq 3,00 \text{ m}$

Fuente: AASHTO 2002, tabla 3.23.1 p. 33.

Donde:

S = separación entre ejes de vigas

Para el puente que se está tratado la separación entre vigas es menor a 3,00 metros y es de dos carriles, por lo tanto el factor a utilizar es:

$$Fd = \frac{S}{1,83}$$

Donde:

Fd = factor de distribución

S = separación entre ejes de vigas

$$Fd = \frac{2,00}{1,83}$$

$$Fd = 1,09$$

Ya con los factores se procede a aplicarlos en las ruedas del camión de carga, obteniendo los siguientes resultados:

$$P' = \frac{W_{ruedas\ delanteras}}{2} FI * Fd$$

$$P = \frac{W_{ruedas\ traseras}}{2} FI * Fd$$

Donde:

P' = peso de una rueda delantera

$W_{ruedas\ delanteras}$ = peso de las dos ruedas delanteras de camión de carga

P = peso de una rueda trasera

$W_{ruedas\ traseras}$ = peso de dos ruedas traseras de camión de carga

$$P' = \left(\frac{2,37\ ton}{2} \right) (1,26)(1,09) = 1,88\ ton$$

$$P = \left(\frac{10,91\ ton}{2} \right) (1,26)(1,09) = 7,50\ ton$$

2.1.4. Cálculo de momento máximo

Con las cargas factoradas se procede a calcular el momento máximo en la viga debido a la carga viva, al no estar al centro de la viga se procede a calcularlo por medio de líneas de influencia. Se calcularán las líneas de influencia para el camión de carga al centro de la viga y en el punto de

momento máximo, se compararán los momentos para utilizar el momento máximo.

- Líneas de influencia: el camión está en $x = 10,00$ metros (centro de la viga)

Aplicando varias cargas unitarias se obtiene el diagrama de la figura 23.

$$Y = \frac{ab}{L}$$

Donde:

Y = ordenada que indica distancia equivalente en línea de influencia

a = distancia del apoyo derecho a carga central

b = distancia del apoyo izquierdo a carga central

L = longitud de la viga

$$Y = \frac{(10,00 \text{ m})(10,00 \text{ m})}{20,00 \text{ m}}$$

$$Y = 5,00 \text{ m}$$

Por triángulos semejantes se calculan los otros valores mostrados en la figura 23. Se observa que el punto crítico se encuentra al centro de la viga y que las cargas se distribuyen de forma simétrica con respecto al centro.

Calculando el momento de carga viva por medio de las líneas de influencia:

$$P' = 1,88 \text{ ton}$$

$$P = 7,50 \text{ ton}$$

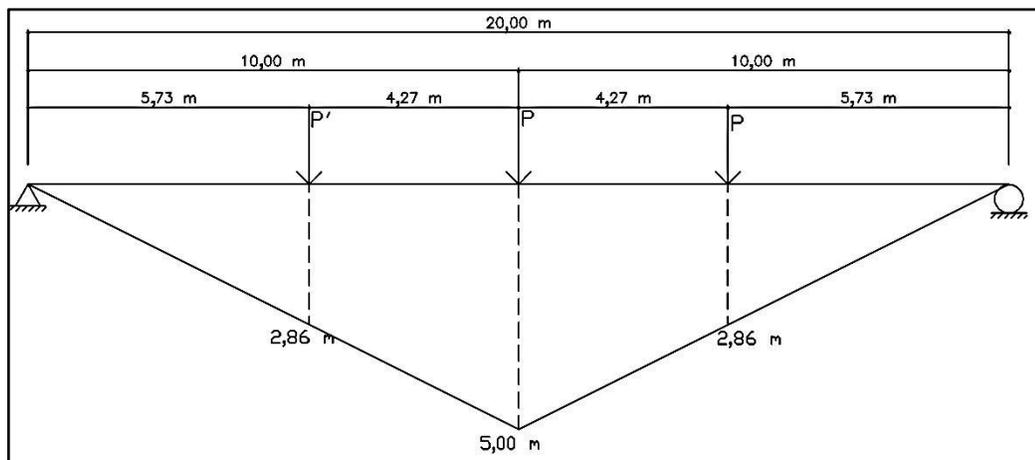
$$M_L = (2,86 \text{ m})(1,88 \text{ ton}) + (5,00 \text{ m})(7,50 \text{ ton}) + (2,86 \text{ m})(7,50 \text{ ton})$$

$$M_L = 64,33 \text{ ton} - m$$

Donde:

M_L = momento de carga viva

Figura 23. Línea de influencia en $x=10,00 \text{ m}$



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2012.

Calculando el momento de carga muerta por medio de las líneas de influencia:

$$M_{dTotal} = M_{d1} + M_{d2}$$

Donde:

M_{d1} = momento de carga muerta distribuida

M_{d2} = momento de carga muerta puntual del diafragma

$$M_{d1} = \frac{1}{2}(5,00 \text{ m})(20,00 \text{ m})(1,90 \text{ ton/m})$$

$$M_{d1} = 95,00 \text{ ton} - m$$

$$M_{d2} = (5,00 \text{ m})(0,73 \text{ ton})$$

$$M_{d2} = 3,65 \text{ ton} - m$$

$$M_{dTotal} = 95,00 \text{ ton} - m + 3,65 \text{ ton} - m$$

$$M_{dTotal} = 98,65 \text{ ton} - m$$

- Líneas de influencia: el camión está en $x=9,29$ metros (posición de momento máximo)

$$Y = \frac{ab}{L}$$

Donde:

Y = ordenada que indica distancia equivalente en línea de influencia

a = distancia del apoyo derecho a carga central

b = distancia del apoyo izquierdo a carga central

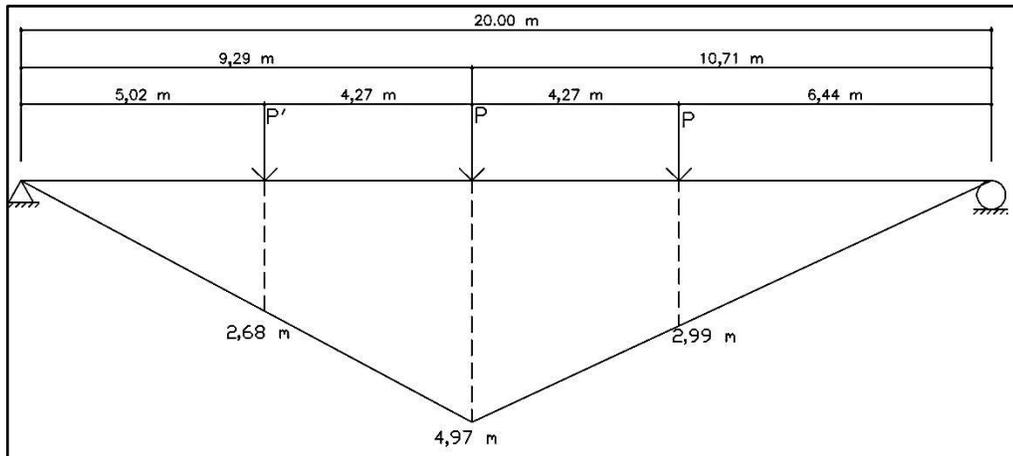
L = longitud de la viga

$$Y = \frac{(9,29 \text{ m})(10,71 \text{ m})}{20 \text{ m}}$$

$$Y = 4,97 \text{ m}$$

Por triángulos semejantes se calculan los otros valores mostrados en la figura 24. Se observa que el punto crítico se encuentra a 9,29 metros de del apoyo, a 0,71 metros corrido del centro del a viga.

Figura 24. Línea de influencia en $x=9,29$ m



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2012.

Calculando el momento de carga viva por medio de las líneas de influencia:

$$P' = 1,88 \text{ ton}$$

$$P = 7,50 \text{ ton}$$

$$M_L = (2,68 \text{ m})(1,88 \text{ ton}) + (2,68 \text{ m})(4,97 \text{ ton}) + (2,99 \text{ m})(7,50 \text{ ton})$$

$$M_L = 64,74 \text{ ton} - m$$

Donde:

$$M_L = \text{momento por carga viva}$$

Calculando el momento de carga muerta por medio de las líneas de influencia:

$$M_{dTotal} = M_{d1} + M_{d2}$$

Donde:

M_{dTotal} = momento total por carga muerta

M_{d1} = momento de carga muerta distribuida

M_{d2} = momento de carga muerta puntual del diafragma

$$M_{d1} = \frac{1}{2}(4,97 m)(20,00 m)(1,90 ton/m)$$

$$M_{d1} = 94,43 ton - m$$

$$M_{d2} = (4,97 m)(0,73 ton)$$

$$M_{d2} = 3,63 ton - m$$

$$M_{dTotal} = 94,43 ton - m + 3,63 ton - m$$

$$M_{dTotal} = 98,06 ton - m$$

Para determinar el momento último se utiliza la tabla 3.22.1A de coeficientes γ y β de la AASTHO 2002 que indica los coeficientes para las diferentes combinaciones de carga. La tabla se reproduce en la figura 25.

La combinación de cargas a utilizar es $M_u = 1,3(M_L + 1,67M_{dTotal})$, por lo tanto los momentos últimos para las dos posiciones del camión de carga son los siguientes:

- Camión de carga en $X=10,00$ metros

$$M_u = 1,3(98,65 ton - m + 1,67(64,33 ton - m))$$

$$M_u = 267,91 ton - m$$

- Camión de carga en $X=9,29$ metros

$$M_u = 1,3(98,06 ton - m + 1,67(64,74 ton - m))$$

$$M_u = 268,03 \text{ ton} - m$$

Al comparar los resultados se comprueba que el momento máximo se encuentra en $x=9,29$ metros, el cual se utilizará para el diseño de la viga.

Figura 25. Tabla de coeficientes γ y β

Col. No.	1	2	3	3A	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
GROUP	γ	β FACTORS													%	
		D	(L+I) _m	(L+I) _p	CF	E	B	SF	W	WL	LF	R+S+T	EQ	ICE		
SERVICE LOAD	I	1.0	1	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0	0	100
	IA	1.0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	150
	IB	1.0	1	0	1	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0	0	**
	II	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	125
	III	1.0	1	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	0	0	0	125
	IV	1.0	1	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	1	0	0	125
	V	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	140
	VI	1.0	1	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	1	0	0	140
	VII	1.0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	133
	VIII	1.0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	140
IX	1.0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	150	
X	1.0	1	1	0	0	β_E	0	0	0	0	0	0	0	0	100	Culvert
LOAD FACTOR DESIGN	I	1.3	β_D	1.67*	0	1.0	β_E	1	1	0	0	0	0	0	0	Not Applicable
	IA	1.3	β_D	2.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	IB	1.3	β_D	0	1	1.0	β_E	1	1	0	0	0	0	0	0	
	II	1.3	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	0	0	0	
	III	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	0	0	0	
	IV	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	1	0	0	
	V	1.25	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	1	0	0	
	VI	1.25	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0.3	1	1	1	0	0	
	VII	1.3	β_D	0	0	0	β_E	1	1	0	0	0	0	1	0	
	VIII	1.3	β_D	1	0	1	β_E	1	1	0	0	0	0	0	1	
IX	1.20	β_D	0	0	0	β_E	1	1	1	0	0	0	0	1		
X	1.30	1	1.67	0	0	β_E	0	0	0	0	0	0	0	0	Culvert	

Fuente: AASHTO 2002 tabla 3.22.1A. p. 31.

2.1.5. Diseño final de la viga

Para el diseño de la viga y calcular el área de acero necesaria para resistir el momento máximo se utiliza la ecuación:

$$\phi M_u = \phi \left[\rho b f_y d^2 \left(1 - 0,6 \frac{\rho f_y}{f'_c} \right) \right]$$

Donde:

ϕ = factor de reducción de resistencia

M_u = momento factorado de la sección

ρ = cuantía de acero de refuerzo

b = ancho de la base de la sección de la viga

f_y = fluencia a tensión del acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra externa a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

f'_c = resistencia a compresión del concreto

Al sustituir los datos conocidos se obtiene una ecuación de segundo grado en función de ρ , y al resolverla se obtienen los siguientes resultados:
 $\rho = 0,003428$, $\rho = 0,107683$.

Al compararlo con el límite máximo de $0,75\rho_b = 0,004515$ se toma como cuantía de acero $\rho = 0,003428$, por lo que el área de acero (A_s) requerida para el momento factorado (M_u) igual a 268,03 tonelada-metro es 67,19 centímetros cuadrados como refuerzo a flexión. Al convertirlo a barras de acero se decidió colocar 8 barras número 11, proveyendo un área de acero (A_s) de 80,48 centímetros cuadrados con $\rho = 0,00410612$ que está todavía por debajo de la cuantía máxima.

Al calcular la altura del eje neutro se obtiene una altura de 7,10 centímetros comprobando que se comporta todavía como una viga rectangular al estar dentro de la altura de la losa.

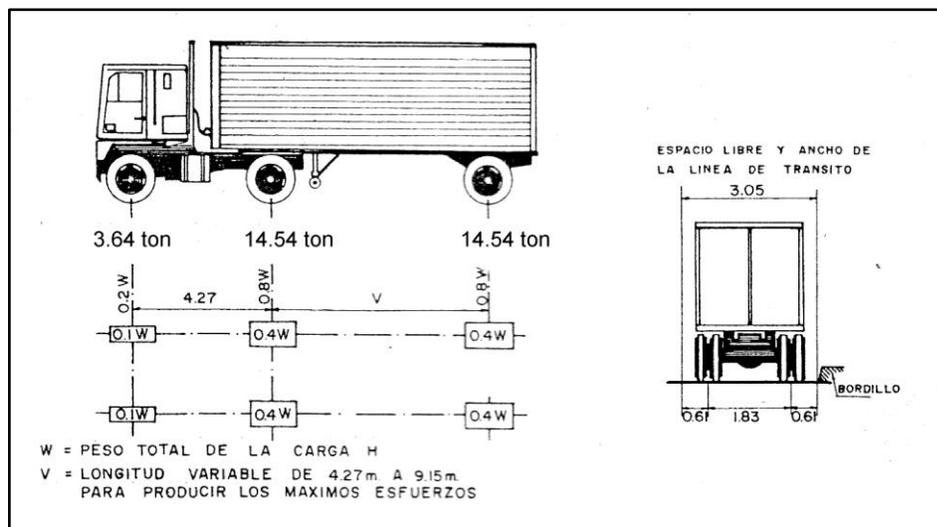
2.2. Diseño de viga bajo camión de carga HS-20

A continuación se desarrolla el diseño de la viga propuesta del puente para obtener el momento necesario a alcanzar y acero de refuerzo que es necesario colocar para la nueva resistencia requerida.

2.2.1. Consideraciones de diseño

El camión de carga a utilizar para el diseño de la nueva viga es el HS-20, que tiene las características mostradas en la figura 26. Tiene las mismas dimensiones pero es más pesado que el HS-15.

Figura 26. Camión de carga HS-20



Fuente: BARRERA, Jerónimo H, Puentes. p.26.

2.2.2. Predimensionamiento de la viga

La superestructura a utilizar para el puente es la misma que se utilizó para diseño con camión de carga HS-15, con la diferencia que ahora se diseñará para un camión de carga HS-20.

2.2.3. Memoria de cálculo

La sección de la viga T es la misma que se utilizó para diseñar con el camión de carga HS-15, por lo que no se repetirán los criterios de predimensionamiento. Con la sección definida se procede a diseñar la viga con el siguiente procedimiento:

2.2.3.1. Determinación de la carga muerta

Al ser la misma sección de viga la carga muerta no cambia, siendo esta la siguiente:

$$w_{total} = 1,90 \text{ ton/m}$$

$$w_{diafragma} = 0,73 \text{ ton/m}$$

2.2.3.2. Determinación de la carga viva

Como la sección de la superestructura no cambia, los factores de impacto y de distribución son los mismos, siendo estos: $FI = 1,26, Fd = 1,09$

Ya con los factores se procede a aplicarlos en las ruedas del camión de carga, obteniendo los siguientes resultados:

$$P' = \left(\frac{3,54 \text{ ton}}{2}\right)(1,26)(1,09) = 2,50 \text{ ton}$$

$$P = \left(\frac{14,54 \text{ ton}}{2}\right)(1,26)(1,09) = 9,98 \text{ ton}$$

2.2.4. Cálculo de momento máximo

Con las cargas factoradas se procede a calcular el momento máximo en la viga debido a la carga viva, al no estar al centro de la viga se procede a calcularlo por medio de líneas de influencia. Se calcularán las líneas de influencia para el camión de carga al centro de la viga y en el punto de momento máximo, se compararán los momentos para utilizar el momento máximo.

2.2.4.1. Líneas de influencia: camión está en x=10,00 metros (centro de la viga)

El diagrama de líneas de influencia se muestra en la figura 27. Muestra que el punto crítico se encuentra en el centro de la viga y se distribuye en forma simétrica con respecto al centro de la viga.

Calculando el momento de carga viva por medio de las líneas de influencia:

$$P' = 2,50 \text{ ton}$$

$$P = 9,98 \text{ ton}$$

$$M_L = (2,86 \text{ m})(2,50 \text{ ton}) + (5,00 \text{ m})(9,98 \text{ ton}) + (2,86 \text{ m})(9,98 \text{ ton})$$

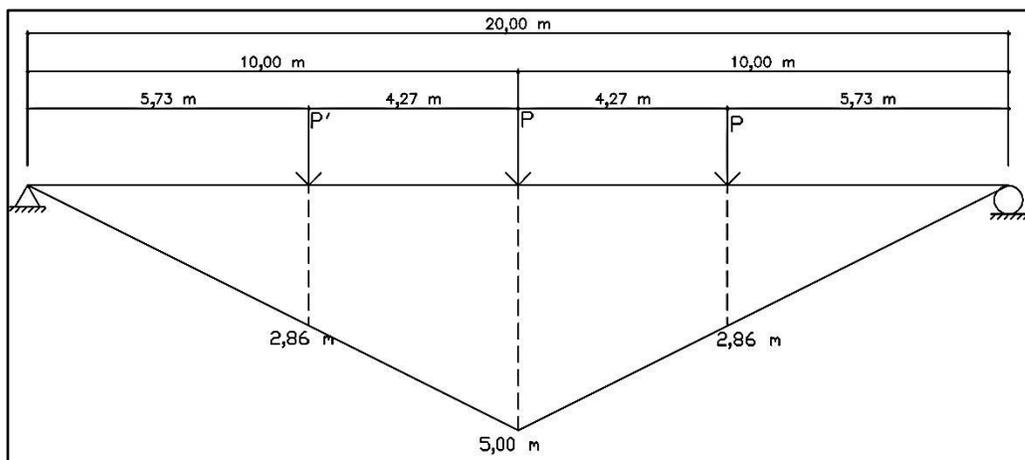
$$M_L = 85,59 \text{ ton} - m$$

Donde:

M_L = momento por carga viva

El momento por carga muerta es el mismo que en el diseño para camión de carga HS-15, este es: $M_{dTotal} = 98,65 \text{ ton} - m$

Figura 27. Línea de influencia en $x=10,00$ metros

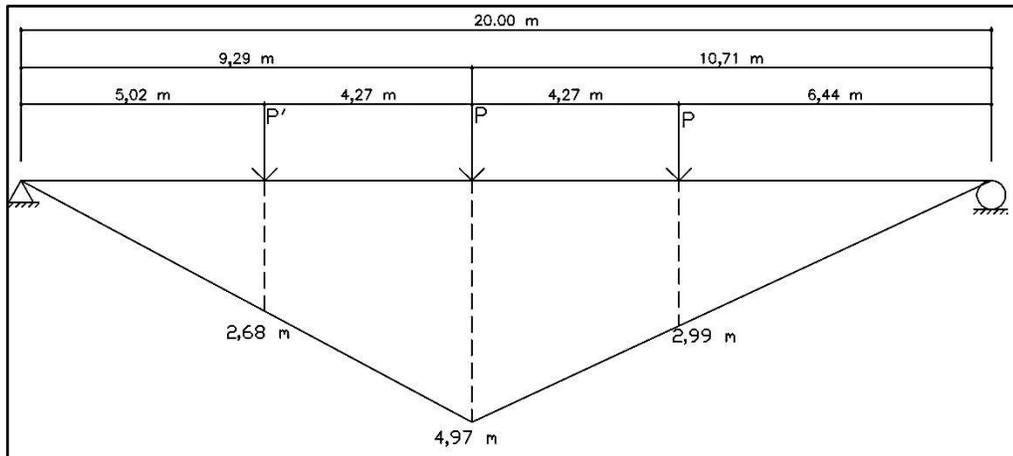


Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2012.

2.2.4.2. Líneas de influencia: el camión está en $x=9,29$ metros (momento máximo)

El diagrama de líneas de influencia se muestra en la figura 28. Se observa que el punto crítico se encuentra a 9,29 metros de del apoyo, a 0,71 metros corrido del centro del a viga, y que la distribución de la carga no es simétrica con respecto al punto de momento máximo.

Figura 28. Línea de influencia en $x=9,29$ metros



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2012

Calculando el momento de carga viva por medio de las líneas de influencia:

$$P' = 2,50 \text{ ton}$$

$$P = 9,98 \text{ ton}$$

$$M_L = (2,68 \text{ m})(2,50 \text{ ton}) + (4,97 \text{ m})(9,98 \text{ ton}) + (2,99 \text{ m})(9,98 \text{ ton})$$

$$M_L = 86,14 \text{ ton} - m$$

Donde:

M_L = momento por carga viva

El momento por carga muerta es el mismo que en diseño para camión de carga HS-15, este es: $M_{dTotal} = 98,06 \text{ ton} - m$, ya que la sección de la viga no cambia.

Para calcular el momento máximo se utiliza la misma ecuación utilizada para el cálculo con el camión de carga HS-15. La combinación de cargas a utilizar es:

$$M_u = 1,3(M_L + 1,67M_{dTotal})$$

Donde:

M_u = momento máximo factorado de la sección

M_L = momento por carga viva

M_{dtotal} = momento total por carga muerta

Por lo tanto, los momentos últimos para las dos posiciones del camión de carga son los siguientes:

- Camión de carga en X=10,00 metros

$$M_u = 1,3(98,06 \text{ ton} - m + 1,67(85,59 \text{ ton} - m))$$

$$M_u = 314,06 \text{ ton} - m$$

- Camión de carga en X=9,29 metros

$$M_u = 1,3(98,06 \text{ ton} - m + 1,67(86,14 \text{ ton} - m))$$

$$M_u = 314,49 \text{ ton} - m$$

Al comparar los resultados se comprueba que el momento máximo se encuentra en x=9,29 metros, el cual se utilizará para el diseño de la viga.

2.2.5. Diseño final de la viga

Para el diseño de la viga y calcular el área de acero necesaria para resistir el momento máximo se utiliza la ecuación:

$$\phi M_u = \phi \left[\rho b f_y d^2 \left(1 - 0,6 \frac{\rho f_y}{f'_c} \right) \right]$$

Donde:

ϕ = factor de reducción de resistencia según ACI 318-08

M_u = momento máximo factorado de la sección

ρ = cuatía de acero de refuerzo

b = ancho de la cara a compresión del elemento

f_y = esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

f'_c = resistencia a compresión del concreto

Al sustituir los datos conocidos se obtiene una ecuación de segundo grado en función de ρ , y al resolverla se obtienen los siguientes resultados: $\rho = 0,004046$, $\rho = 0,107066$.

Al compararlo con el límite máximo de $0,75\rho_b = 0,004515$ se toma como cuantía de acero $\rho = 0,004046$, por lo que el área de acero (A_s) requerida para el momento factorado (M_u) igual a 314,49 tonelada metro es 79 centímetros cuadrados como refuerzo a flexión. Al convertirlo a barras de acero se convierten en 8 barras número 11 y una número.8, proveyendo un área de

acero (A_s) de 85,85 centímetros cuadrados con $\rho = 0,0043663$ que está todavía por debajo de la cuantía máxima.

Al calcular la altura del eje neutro da una altura de 7,55 centímetros, comprobando que se comporta todavía como una viga rectangular al estar dentro de la altura de la losa.

2.3. Comparación entre las vigas diseñadas para HS-15 y HS-20

Después de realizar el diseño de las dos superestructuras podemos comparar los datos obtenidos para los diferentes camiones de carga utilizados. Estos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla V. **Comparación de momentos y área de acero**

Camión de diseño	$M_u(\text{ton} - \text{m})$	$A_s(\text{cm}^2)$
HS-15	268,03	80,48
HS-20	31,49	85,58

Fuente: elaboración propia.

2.3.1. Diferencia de momentos máximos

Al comparar el resultado del momento máximo de cada viga se puede ver una diferencia de momentos y de área de acero. Se llega a la conclusión que el puente diseñado con el camión de carga HS-15 tiene una deficiencia de refuerzo y no soporta el paso de un camión de carga HS-20. La diferencia de momentos es igual a:

$$\Delta M_u = 31,49 \text{ ton} - m - 268,03 \text{ ton} - m = 46,46 \text{ ton} - m$$

Que representa un 14,77 por ciento de capacidad de carga menor que la requerida. Aunque es relativamente poco, el paso continuo de vehículos del peso del camión de carga HS-20 puede provocar largo plazo grietas por flexión al sobre esforzar los materiales y la viga, poniendo en riesgo la estructura.

2.3.2. Refuerzo necesario para aumentar la capacidad de carga de camión de carga HS-15 a HS-20

Para calcular el refuerzo necesario se utiliza la diferencia de momentos obtenida y se sustituye en la ecuación:

$$\phi M_u = \phi \left[\rho b f_y d^2 \left(1 - 0,6 \frac{\rho f_y}{f'_c} \right) \right],$$

Donde:

ϕ = factor de reducción de resistencia según ACI 318-08

M_u = momento máximo factorado de la sección

ρ = cuatía de acero de refuerzo

b = ancho de la cara a compresión del elemento

f_y = esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema a compresión hacia el centroide del refuerzo a tensión.

f'_c = resistencia a compresión del concreto

Se obtiene como resultado un área de acero de refuerzo (A_s) de 11,35 centímetros cuadrados para el momento ultimo (M_u) 46,46 tonelada-metro. Este refuerzo de acero adicional se debe colocar en la viga, pero su colocación por métodos tradicionales es difícil, y por ser un una viga de puente hay una dificultad extra en el trabajo, por lo que el refuerzo de fibra de carbono se calculará para remplazar ese acero adicional necesario.

3. ANÁLISIS DE REPARACIÓN Y DE REFUERZO DE VIGA DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO FIBRA DE CARBONO

3.1. Evaluación y análisis de la viga de concreto reforzado dañada

La viga diseñada en el capítulo anterior fue dañada por varios golpes que recibió de camiones con carga demasiado alta, ocasionando reducción de la sección de la viga por la pérdida de concreto del recubrimiento, pérdida de acero de refuerzo y la fractura del concreto. Debido a la reducción de la sección de la viga el eje neutro se movió hacia arriba provocando fisuras en el concreto, la cuales pueden ser superficiales o grietas que atraviesan toda la sección de la viga provocando la falla la viga por completo.

Previo al inicio de la reparación de la viga dañada se deben realizar ensayos no destructivos para conocer el tipo, distribución y cantidad de acero de refuerzo se utilizó en su construcción, este ensayo se puede hacer con un equipo de radar R-METER MK III. Para conocer la resistencia del concreto se realiza el ensayo de prueba de índice de rebote con el martillo esclerométrico marca Schmidt siguiendo la Norma ASTM C805 que indica cómo realizar el ensayo, tabular e interpretar los resultados. Adicionalmente se deben tomar muestras del acero para conocer el grado de resistencia, teniendo cuidado de no causar más daño a la viga.

Otra información que es importante obtener de la viga son las dimensiones de la sección, su longitud, tipo de apoyo y cargas que soporta. Con esta información el Ingeniero Estructural procede a realizar la evaluación de las vigas dañadas para determinar su resistencia actual y la cantidad de refuerzo adicional a colocar para aumentar su resistencia de camiones de carga HS-15 a HS-20 que transitan actualmente.

En este caso la sección de la viga es conocida, pues se reforzará la viga diseñada en el capítulo 2 sección 2.1 para que soporte el camión de carga HS-20 según el diseño de la viga de la sección 2.2. Las características de la superestructura se resumen en la tabla VI.

Tabla VI. **Propiedades de la superestructura**

Propiedades de la viga	
L	20,00 m
b	2,00 m
S	2,00 m
b_w	0,40 m
h_f	0,18 m
d	980 mm
h	1 030 mm
f'_c	28 N/mm ² (4 000psi)
f_y	420 N/mm ² (60 000psi)
ϕM_n sin CFRP	2 813,70 kN-m

Fuente: elaboración propia.

El refuerzo de fibra de carbono que se utilizará es fabricado por Sika y se propone utilizar 3 tiras de 120 milímetros de ancho, colocadas a lo ancho la cara inferior de la viga. Sus propiedades son obtenidas de la hoja técnica del producto Sika Carbodur resumidas en la tabla VII.

Tabla VII. **Propiedades de la fibra de carbono**

Sika Carbodur S 1214	
Espesor por tira, t_f	1,40 mm
Resistencia última a tensión, f_{fu}^*	3 100,00 N/mm ²
Deformación de falla, ε_{fu}^*	1,70%
Módulo de elasticidad del FRP, E_f	165 000 N/mm ²

Fuente: Sika Carbodur Plates, Sika.

Las cargas y momentos de las vigas de la superestructura se resumen en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Cargas y momentos**

Cargas y Momentos		
Carga/Momento	Carga actual HS-15	Carga esperada HS-20
Carga muerta w_{DL}	18,98 N/mm	18,98 N/mm
Carga viva W_{LL}	8,27 N/mm	11,01 N/mm
Cargas sin factorar $W_{LL} + W_{DL}$	27,25 N/mm	29,98 N/mm
Carga Limite sin reforzar $1,1W_{DL} + 0,75W_{LL}$	N/A N/mm	29,13 N/mm

Continuación de la tabla VIII.

Carga factorada $1,3(W_{DL} + 1,67W_{LL})$	42,63 N/mm	48,56 N/mm
Momento carga muerta M_{DL}	960,99 kN-m	960,99 kN-m
Momento carga viva M_{LL}	634,45 kN-m	844,17 kN-m
Momento carga de servicio M_S	1 595,44 kN-m	1 805,16 kN-m
Momento Límite sin refuerzo $(1,1W_{DL} + 0,75M_{LL})$	N/A	1 690,22 kN-m
Momento Factorado $M_u = (1,3(W_{DL} + 1,67W_{LL}))$	2 626,68 kN-m	3 081,98 kN-m

Fuente: elaboración propia.

3.2. Cálculo de refuerzo con fibra de carbono

Antes de iniciar el cálculo del refuerzo de la fibra de carbono se debe verificar que la estructura cumpla con el criterio de esfuerzo límite, según se la siguiente ecuación:

$$(\phi M_n)_{w/o} > 1,1M_{DL} + 0,75M_{LL},$$

Donde:

ϕ = factor de reducción de resistencia según ACI 318-08

$(M_n)_{w/o}$ = resistencia nominal a flexión sin refuerzo CFRP

M_{DL} = momento por carga muerta

M_{LL} = momento por carga viva

La ecuación estipula que el momento existente sin refuerzo CFRP $(\phi M_n)_{w/o} = 2\,813,71 \text{ kN} - \text{m}$, debe ser mayor que el momento límite sin refuerzo con la carga anticipada $1,1M_{DL} + 0,75M_{LL} = 1\,690,22 \text{ kN} - \text{m}$, criterio que se explicó en capítulos anteriores. El procedimiento de cálculo se desarrolla a continuación.

- Paso 1: cálculo de las propiedades del sistema CFRP

Al ser una viga de puente su condición de exposición es exterior, por lo tanto según la tabla II el factor de reducción a utilizar es de 0,85.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \rightarrow f_{fu} = (0,85)(3\,100 \text{ N/mm}^2) = 2\,635,00 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \rightarrow \varepsilon_{fu} = (0,85)(0,0170 \text{ mm/mm}) = 0,01445 \text{ mm/mm}$$

Donde:

f_{fu} = resistencia última de diseño a tensión

C_E = coeficiente de reducción ambiental

f_{fu}^* = resistencia última del material CFRP según fabricante

ε_{fu} = deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP

ε_{fu}^* = deformación última de ruptura del refuerzo CFRP

- Paso 2: cálculos preliminares

$$E_c = 4\,730\sqrt{f'_c} \rightarrow E_c = 4\,730\sqrt{28 \text{ N/mm}^2} = 25\,028,81 \text{ N/mm}^2$$

Donde:

E_c = módulo de elasticidad del concreto

f'_c = resistencia a compresión del concreto

De las propiedades del concreto según AASHTO 2002, sección 8.16.2.7 obtenemos:

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \frac{f'_c}{6,9}$$

Donde:

β_1 = proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente

Sustituyendo

$$\beta_1 = 1,05 - 0,05 \frac{28 \text{ N/mm}^2}{6,9} = 0,85$$

El área de refuerzo del CFRP se calcula con la ecuación:

$$A_f = n f_t w_f$$

Donde:

A_f = área de refuerzo CFRP

n = número de capas de refuerzo CFRP

t_f = espesor nominal de una capa de refuerzo CFRP

w_f = ancho de la capa de refuerzo CFRP

Sustituyendo

$$A_f = (1 \text{ capa})(1,40 \text{ mm/capa})(360 \text{ mm}) = 504 \text{ mm}^2$$

Se obtiene que el área de refuerzo CFRP es $A_f = 504$ milímetros cuadrados.

- Paso 3: determinar la deformación existente en la cara inferior

La deformación existente es calculada asumiendo que la viga está fracturada y las únicas cargas actuando sobre la viga al momento de la colocación del refuerzo CFRP es la carga muerta. El análisis es el siguiente:

Para determinar el momento de inercia de la sección fisurada, I_{cr} . Primero se calcula la posición del eje neutro de la viga T. Sustituyendo y resolviendo para c la ecuación:

$$b_w(c - h_f)^2 - 2nA_s(d - c) + bh_f(2c - h_f) = 0$$

Donde:

b_w = ancho del alma de la viga

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

h_f = espesor de la losa

n = relación modular del os materiales, con valor de 8

A_s = área de acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo

b = ancho de la cara a compresión del elemento

$$b_w = 0,40 \text{ m}$$

$$h_f = 0,18 \text{ m}$$

$$n = 8$$

$$A_s = 0,006719 \text{ m}^2$$

$$d = 0,98 \text{ m}$$

$$b = 2,00 \text{ m}$$

Sustituyendo datos se obtiene que $c = 0,21$ metros, que es mayor que el espesor del ala de la viga, por lo tanto el I_{cr} se tiene que calcular para una viga T. Al sustituir los datos de la sección de la viga en la siguiente fórmula,

$$I_{cr} = \frac{1}{3}b_w(c - h_f)^3 + \frac{1}{12}bh_f^3 + bh_f\left(c - \frac{h_f}{2}\right)^2 + nA_s(d - c)^2,$$

Donde:

I_{cr} = momento de inercia de la sección fisurada

b_w = ancho del alma de la viga

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

h_f = espesor de la losa

b = ancho de la cara a compresión del elemento

n = relación modular de los materiales, con valor de 8

A_s = área de acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo

Sustituyendo datos en la ecuación se obtiene

$$b_w = 0,40 \text{ m}$$

$$c = 0,21 \text{ m}$$

$$h_f = 0,18 \text{ m}$$

$$b = 2,00 \text{ m}$$

$$n = 8$$

$$A_s = 0,006719 \text{ m}^2$$

$$d = 0,98 \text{ m}$$

$$I_{cr} = 3,8029 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

k se obtiene de la relación $c = kd$ del área de compresión de la viga. Al sustituir se obtiene $k = 0,2143$.

La deformación se obtiene por medio de la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr}E_c}$$

Donde:

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

M_{DL} = momento por carga muerta

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

k = proporción de la profundidad del eje neutro al refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo

I_{cr} = momento de inercia de la sección fisurada

E_c = módulo de elasticidad del concreto

$$\varepsilon_{bi} = \frac{(960,99 \text{ kN} - \text{mm})(1\,030 \text{ mm} - (0,2143)(980 \text{ mm}))}{(3,8029 \times 10^{10} \text{ mm}^4)(25\,028,81 \text{ N/mm}^2)}$$

$$\varepsilon_{bi} = 0,000828$$

- Paso 4: determinar la deformación de diseño del sistema CFRP

La deformación de diseño del CFRP, ε_{fd} se calcula para que falle por pérdida de adherencia con el concreto mediante la ecuación:

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0,9\varepsilon_{fu}$$

Donde:

ε_{fd} = deformación unitaria por pérdida de adherencia del refuerzo CFRP

f'_c = resistencia a compresión del concreto

n = número de capas del refuerzo CFRP

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

t_f = espesor nominal de una capa de refuerzo CFRP

ε_{fu} = deformación de ruptura de diseño del refuerzo CFRP

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{28 \text{ N/mm}^2}{(1 \text{ capa})(165\,000 \text{ N/mm}^2)(1,40 \text{ mm})}} \leq 0,90(0,01445)$$

$$\varepsilon_{fd} = 0,0045 \leq 0,0130$$

Debido a que la ecuación sí se cumple por ser la deformación de diseño menor que la deformación de ruptura, el tipo de falla que gobierna el sistema CFRP es por pérdida de adherencia.

- Paso 5: estimación de c , la profundidad del eje neutro

Un valor razonable de c para iniciar es $0,20d$. El valor de c es ajustado después de comparar el equilibrio entre el valor de c asumido y c calculado. Este valor sugerido es $c = 196,00$ milímetros, y al realizar los cálculos no se obtiene el equilibrio buscado, por lo que por motivos ilustrativos se utiliza para los cálculos siguientes $c = 158,51$ milímetros, valor donde se alcanza el equilibrio.

- Paso 6: determinar el nivel de deformación efectiva del refuerzo CFRP

La deformación efectiva se encuentra con la ecuación:

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

Donde:

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

ε_{fd} = deformación unitaria por pérdida de adherencia del refuerzo CFRP

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left(\frac{1\,030\text{ mm} - 158,51\text{ mm}}{158,51\text{ mm}} \right) - 0,000828 \leq 0,0045$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,0157 > 0,0045$$

La condición no se cumple, por lo tanto $\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0,0045$

Debe notarse que para la profundidad del eje neutro seleccionada, la falla por adherencia debe ser el modo de falla gobernante porque la segunda expresión de la ecuación gobierna. Si la primera expresión de la ecuación gobierna la falla por aplastamiento del concreto es la que gobierna. Debido a que el CFRP controla el modo de falla de la sección, la deformación unitaria del concreto a la falla ε_c debe ser menor que 0,003, y se calcula con la ecuación:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right).$$

Donde:

ε_c = deformación del concreto

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

$$\varepsilon_c = (0,0045 + 0,000828) \left(\frac{158,51 \text{ mm}}{1\ 030 \text{ mm} - 158,51 \text{ mm}} \right)$$

$$\varepsilon_c = 0,000969$$

Se puede verificar que la deformación del concreto cumple con la condición.

- Paso 7: cálculo de la deformación en el acero de refuerzo existente

Esta deformación se calcula según la siguiente fórmula:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

Donde:

ε_s = deformación del acero de refuerzo

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP alcanzada en la falla

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

$$\varepsilon_s = (0,0045 + 0,000828) \left(\frac{980 \text{ mm} - 158,51 \text{ mm}}{1\ 030 \text{ mm} - 158,51 \text{ mm}} \right)$$

$$\varepsilon_s = 0,005022$$

- Paso 8: cálculo del esfuerzo en el acero de refuerzo y en el CFRP

El esfuerzo en el acero de refuerzo se calcula utilizando:

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$$

Donde:

f_s = esfuerzo del acero de refuerzo

E_s = módulo de elasticidad a tensión del acero de refuerzo

ε_s = deformación del acero de refuerzo

f_y = esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

$$f_s = (200,00 \text{ kN/mm}^2)(0,005022) \leq 0,4200 \text{ kN/mm}^2$$

$$f_s = 1,0044 \text{ kN/mm}^2 > 0,4200 \text{ kN/mm}^2$$

Debido a que $f_s > f_y$, entonces $f_s = 0,4200 \text{ kN/mm}^2$

El esfuerzo en el CFRP se calcula utilizando la ecuación:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}$$

Donde:

f_{fe} = esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

ε_{fe} = deformación efectiva del refuerzo CFRP

$$f_{fe} = (165,00 \text{ kN/mm}^2)(0,0045) = 0,7425 \text{ kN/mm}^2$$

- Paso 9: cálculo de fuerzas internas resultantes y revisión de equilibrio

Los Factores del bloque de esfuerzos se basan en una distribución parabólica de la relación esfuerzo/deformación del concreto calculados de la forma siguiente:

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - 2\varepsilon_c} \quad \alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1\varepsilon'_c} \quad \varepsilon'_c = \frac{1.7f'_c}{E_c}$$

Donde:

ε'_c = máxima deformación del concreto no confinado correspondiente a f'_c

ε_c = deformación del concreto

β_1 = proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos y la profundidad del eje neutro

α_1 = factor del f'_c para calcular intensidad del rectángulo equivalente de esfuerzos y la profundidad del eje neutro

f'_c = resistencia a compresión del concreto

E_c = módulo de elasticidad del concreto

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7(28 \text{ N/mm}^2)}{25 \text{ 028,81 N/mm}^2} = 0,001902$$

$$\beta_1 = \frac{4(0,001902) - 0,000969}{6(0,001902) - 2(0,000969)} = 0,70076$$

$$\alpha_1 = \frac{3(0,001902)(0,000969) - (0,000969)^2}{3(0,70076)(0,001902)^2} = 0,603553$$

El equilibrio de esfuerzos se hace comparando el valor inicial de c con

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b}$$

Donde:

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

A_s = área de acero de refuerzo

f_s = esfuerzo del acero de refuerzo

A_f = área de refuerzo CFRP

f_{fe} = esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla

α_1 = factor del f'_c para calcular intensidad del rectángulo equivalente de factor de esfuerzos de concreto

f'_c = resistencia a compresión del concreto

β_1 = proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente de esfuerzos y la profundidad del eje neutro

b = ancho de la cara a compresión del elemento

$$c = \frac{(8,048 \text{ mm}^2)(0,4200 \text{ kN/mm}^2) + (504 \text{ mm}^2)(0,7245 \text{ kN/mm}^2)}{(0,603553)(0,0280 \text{ kN/mm}^2)(0,70076)(2\ 000 \text{ mm})}$$

$$c = 158,51 \text{ mm}$$

- Paso 10: ajuste de c hasta obtener equilibrio

El valor de c asumido y el c calculado son iguales, por lo que existe equilibrio de esfuerzos. Si los dos valores de c no coinciden, los pasos 6 al 9 se repiten hasta obtener equilibrio.

- Paso 11: cálculo del esfuerzo a flexión de los componentes

El esfuerzo a flexión de diseño se calcula utilizando la ecuación:

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

Donde:

M_n = resistencia nominal a flexión

A_s = área de acero de refuerzo

f_s = esfuerzo del acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo a tensión.

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

β_1 = proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente

ψ_f = factor de reducción de resistencia del refuerzo CFRP para flexión

A_f = área del refuerzo CFRP

f_{fe} = esfuerzo efectivo del refuerzo CFRP en la sección de falla

Un factor adicional de reducción, $\psi_f = 0,85$, es aplicado a la contribución del sistema CFRP.

- Contribución del acero:

$$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

Donde:

M_{ns} = resistencia nominal a flexión del acero

A_s = área de acero de refuerzo

f_s = esfuerzo del acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

β_1 = proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente

$$M_{ns} = (8\,048\text{ mm}^2)(0,4200\text{ kN/mm}^2)\left(980\text{ mm} - \frac{(0,70076)(158,51\text{ mm})}{2}\right)$$

$$M_{ns} = 3\,124\,826,99\text{ kN} - \text{mm} = 3\,124,83\text{ kN} - \text{m}$$

- Contribución del CFRP:

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

Donde:

M_{nf} = resistencia nominal a flexión del refuerzo CFRP

f = área del refuerzo CFRP

f_{fe} = esfuerzo efectivo en el refuerzo CFRP alcanzado en la sección al momento de la falla.

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

c = distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro

β_1 = proporción entre la profundidad del bloque rectangular equivalente

$$M_{nf} = (504 \text{ mm}^2)(0,7425 \text{ kN/mm}^2) \left(1030 \text{ mm} - \frac{(0,70076)(158,51 \text{ mm})}{2} \right)$$

$$M_{nf} = 364\,662,90 \text{ kN} - \text{mm} = 364,66 \text{ kN} - \text{m}$$

- Paso 12: cálculo de la resistencia de diseño a flexión de la sección

La resistencia a diseño a flexión de la sección se calcula utilizando la ecuación $\phi M_n \geq M_u$. El factor de reducción ϕ se calcula según la siguiente ecuación:

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

Donde:

ϕ = factor de reducción de resistencia según ACI 318-08

ε_t = deformación unitaria del acero en tensión

ε_{sy} = deformación unitaria del acero correspondiente al punto fluencia

Dado que $\varepsilon_s = 0,005022 \geq 0,005$, el factor de reducción a utilizar es $\phi = 0,90$.

M_n se calcula según ecuación:

$$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \psi_f M_{nf}]$$

Donde:

ϕ = factor de reducción de resistencia según ACI 318-08

M_n = resistencia nominal a flexión

M_{ns} = resistencia nominal a flexión del acero

M_{nf} = resistencia nominal a flexión del refuerzo CFRP

ψ_f = factor de reducción de resistencia del refuerzo CFRP para flexión

$\psi_f = 0,85$

$$\phi M_n = 0,90 [3\ 124,83\ kN - m + (0,85)(364,66\ kN - m)]$$

$$\phi M_n = 3\ 091,31\ kN - m \geq 3\ 081,98\ kN - m$$

Se obtiene el resultado satisfactorio de que la sección reforzada es capaz de sostener la nueva carga requerida.

- Paso 13: evaluación de los esfuerzos de servicio en el acero de refuerzo en el CFRP

El cálculo de la profundidad del eje neutro de la sección fisurada puede ser simplificado para una viga rectangular sin refuerzo a compresión según la ecuación:

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{d_f}{d}\right)\right)} - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)$$

Donde:

k = proporción de la profundidad del eje neutro al refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.

ρ_s = cuantía de acero de refuerzo

E_s = módulo de elasticidad a tensión del acero de refuerzo

E_c = módulo de elasticidad del concreto

ρ_f = cuantía del refuerzo CFRP

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd}$$

Donde:

ρ_s = cuantía de acero de refuerzo

A_s = área de acero de refuerzo

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo

b = ancho de la cara a compresión del elemento

$$\rho_s = \frac{8\,048\text{ mm}^2}{(2\,000\text{ mm})(980\text{ mm})} = 0,004106$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd_f}$$

Donde:

ρ_f = cuantía del refuerzo CFRP

A_f = área de refuerzo CFRP

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

b = ancho de la cara a compresión del elemento

$$\rho_f = \frac{504\text{ mm}^2}{(2\,000\text{ mm})(1\,030\text{ mm})} = 0,000245$$

Sustituyendo datos en la ecuación:

$$\rho_s = 0,004106$$

$$E_s = 200\,000\text{ N/mm}^2$$

$$E_c = 25\,028,81\text{ N/mm}^2$$

$$E_f = 165\,000\text{ N/mm}^2$$

$$\rho_f = 0,000245$$

$$d_f = 1\,030\text{ mm}$$

$$d = 980\text{ mm}$$

$$k = 0,2305$$

$$kd = (0,2305)(980 \text{ mm})$$

$$kd = 225,89 \text{ mm}$$

El esfuerzo en el acero de refuerzo se calcula y verifica que sea menor que el límite recomendado con la ecuación:

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) (d_f - kd)} \leq 0,80 f_y$$

Donde:

$f_{s,s}$ = esfuerzo en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio

M_s = momento de servicio de la sección

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

A_f = área de refuerzo CFRP

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

k = proporción entre la profundidad del eje neutro y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo

E_s = módulo de elasticidad del acero de refuerzo

A_s = área de acero de refuerzo

Sustituyendo datos en la ecuación:

$$M_s = 1\,805,16 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\varepsilon_{bi} = 0,000828$$

$$A_f = 504 \text{ mm}^2$$

$$E_f = 165\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$d_f = 1\,030 \text{ mm}$$

$$d = 980 \text{ mm}$$

$$E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$k = 0,2305$$

$$A_s = 8\,048 \text{ mm}^2$$

$$f_{s,s} = 0,2428 \text{ kN/mm}^2 \leq 0,80(0,42 \text{ kN/mm}^2)$$

$$f_{s,s} = 242,84 \text{ N/mm}^2 \leq 336,00 \text{ N/mm}^2$$

El nivel de esfuerzo en el acero de refuerzo sí cumple con el límite recomendado.

- Paso 14: verificación del límite de flujo plástico (creep) del CFRP bajo cargas de servicio

El esfuerzo en el CFRP debe ser menor que el esfuerzo de ruptura del límite plástico dado en la tabla III, siendo calculado por la ecuación:

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{d_f - kd}{d - kd} \right) - \varepsilon_{bi} E_f < 0,55 f_{fu}$$

Donde:

$f_{f,s}$ = esfuerzo en el refuerzo CFRP dentro del rango elástico

$f_{s,s}$ = esfuerzo en el acero de refuerzo bajo cargas de servicio

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

d_f = altura efectiva del refuerzo CFRP a flexión

k = proporción entre la profundidad del eje neutro y de la profundidad del refuerzo medido desde la fibra extrema a compresión.

d = distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide del refuerzo

E_s = módulo de elasticidad del acero de refuerzo

ε_{bi} = deformación en el concreto al momento de colocar el refuerzo CFRP

f_{fu} = esfuerzo de diseño último a tensión del refuerzo CFRP

Sustituyendo datos en la ecuación:

$$f_{f,s} = 242,84 \text{ N/mm}^2$$

$$E_f = 165\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$d_f = 1\,030 \text{ mm}$$

$$d = 980 \text{ mm}$$

$$E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$k = 0,2305$$

$$\varepsilon_{bi} = 0,000828$$

$$f_{fu} = 2\,635 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{f,s} = 77,01 \text{ N/mm}^2 \leq 1\,449,25 \text{ N/mm}^2$$

El cálculo de k , $f_{f,s}$, $f_{s,s}$ se muestran en las notas 1, 2 y 3 respectivamente de la figura 29.

Figura 29. Ecuaciones para calcular esfuerzos de servicio en acero y refuerzo CFRP

Nota 1

$$k = \sqrt{\left[0,004106 \left(\frac{200.000}{25.028,81} \right) + 0,000245 \left(\frac{165.000}{25.028,81} \right) \right]^2 + 2 \left[0,004106 \left(\frac{200.000}{25.028,81} \right) + 0,000245 \left(\frac{165.000}{25.028,81} \right) \right] \left(\frac{1.030}{980} \right) - \left[0,004106 \left(\frac{200.000}{25.028,81} \right) + 0,000245 \left(\frac{165.000}{25.028,81} \right) \right]}$$

Nota 2

$$f_{fs} = 242,84 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \left(\frac{165.000 \text{ N}}{200.000 \text{ N}} \right) \left(\frac{1.030 \text{ mm} - 225,89 \text{ mm}}{980 \text{ mm} - 225,89 \text{ mm}} \right) - (0,000828) (165.000 \text{ N}/\text{mm}^2) \leq (0,55) (2.635,00 \text{ N}/\text{mm}^2)$$

Nota 3

$$f_{as} = \frac{\left[1.805,160 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} + (0,000828) (50,4 \text{ mm}^2) \left(\frac{1.030 \text{ mm} - 225,89 \text{ mm}}{3} \right) \right] (980 \text{ mm} - 225,89 \text{ mm}) (20 \text{ kN}/\text{mm}^2)}{(8,048 \text{ mm}^2) (200 \text{ kN}/\text{mm}^2) (980 \text{ mm} - 225,89 \text{ mm}) + (50,4 \text{ mm}^2) (1,65 \text{ kN}/\text{mm}^2) \left(\frac{1.030 \text{ mm} - 225,89 \text{ mm}}{3} \right) (1,030 \text{ mm} - 225,89 \text{ mm})}$$

Fuente: elaboración propia.

La ecuación se cumple, por lo que el esfuerzo en el CFRP está dentro de los límites recomendados para los esfuerzos de cargas cíclicas.

La fuerza de corte factorada al final del refuerzo CFRP debe ser comparada contra la fuerza de corte que provoca que pierda adherencia el refuerzo CFRP en sus extremos, que debe ser 2/3 de la resistencia a corte del concreto. Si la fuerza de corte es mayor se deben colocarse tiras transversales en forma de U en los extremos del refuerzo CFRP. Esto no se calculará por estar fuera del alcance del objetivo este documento.

3.2.1. Detalle del refuerzo CFRP

La capacidad de adherencia del CFRP es desarrollada sobre una longitud de desarrollo l_{df} , pues para desarrollar el esfuerzo efectivo del CFRP en la sección el anclaje disponible debe ser mayor que l_{df} , según la ecuación:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f'_c}}}$$

Donde:

l_{df} = longitud de desarrollo del refuerzo CFRP

n = número de capas del refuerzo CFRP

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

E_f = módulo de elasticidad a tensión del refuerzo CFRP

t_f = espesor nominal de una capa de refuerzo CFRP

f'_c = resistencia a compresión del concreto

La longitud del refuerzo CFRP está determinado por el momento de fisuramiento M_{cr} , ya que para vigas simplemente apoyadas el extremo de una capa de refuerzo CFRP debe terminar por lo menos una distancia igual a l_{df} pasado del punto donde se encuentra el M_{cr} .

Para realizar un rápido análisis del lugar donde se deben colocar los extremos del refuerzo CFRP en vigas simplemente apoyadas, la norma indica que para refuerzo CFRP de una sola capa los extremos deben terminar a una distancia por lo menos igual a la longitud de desarrollo l_{df} pasado del punto que corresponde al momento de agrietamiento M_{cr} en la viga. Para refuerzo FRP formado por múltiples capas la terminación en los extremos debe ser escalonada. La capa más externa debe terminar a una distancia no menor de l_{df} pasado el punto que corresponde al M_{cr} de la viga. Cada capa sucesiva debe terminar a una distancia no menor de 150 milímetros (6 pulgadas) más allá de la capa previa, según se muestra en la figura 30.

Como primer paso se necesita encontrar la posición del M_{cr} , para esto se procede a calcularlo con la fórmula:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t} \qquad f_r = 0,62\sqrt{f'_c}$$

Donde:

M_{cr} = momento de fisuramiento del elemento

f_r = módulo de ruptura

I_g = momento de inercia de la sección gruesa

y_t = distancia vertical medida desde el centro de gravedad de la sección

f'_c = resistencia a compresión del concreto

Se tiene que

$$f_r = 0,62 \sqrt{28 \text{ N/mm}^2} = 3,28 \text{ N/mm}^2$$

$$I_g = 6,7819 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

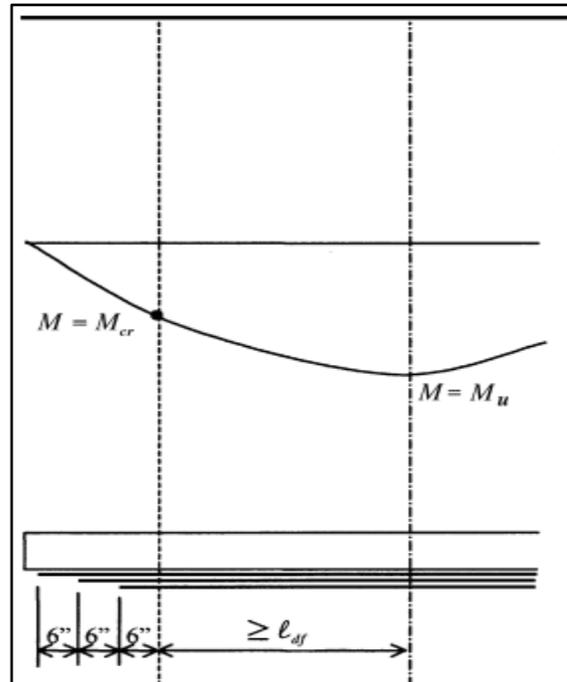
$$y_t = 689,90 \text{ mm}$$

Sustituyendo los datos anteriores en ecuación se obtiene

$$M_{cr} = \frac{(3,28 \text{ N/mm}^2)(6,7819 \times 10^{10} \text{ mm}^4)}{689,90 \text{ mm}} = 3,2243 \times 10^8 \text{ N} - \text{mm}$$

$$M_{cr} = 32,90 \text{ ton} - \text{m}$$

Figura 30. Terminación de varias capas de refuerzo FRP



Fuente: ACI 440.2R-08. Guía para diseño y construcción de sistemas FRP externamente adheridos. p. 39.

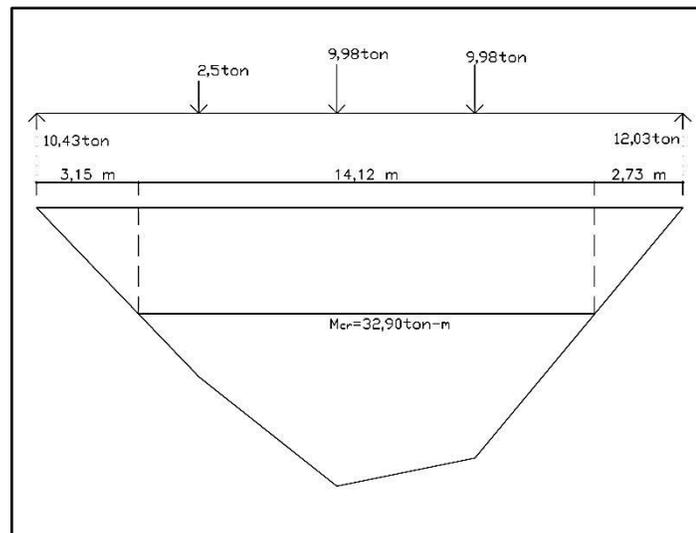
Conociendo el M_{cr} se procede a realizar el diagrama de momentos de la viga con el nuevo camión de carga para localizarlo y poder calcular la longitud del refuerzo a lo largo de la viga mostrado en la figura 31.

Se procede a calcular la longitud de desarrollo del refuerzo CFRP l_{df}

$$l_{df} = \sqrt{\frac{(1)(165\,000\text{ N/mm}^2)(1,4\text{ mm})}{\sqrt{28\text{ N/mm}^2}}}$$

$$l_{df} = 208,93\text{ mm} \approx 209\text{ mm}$$

Figura 31. **Diagrama de momentos carga HS-20**



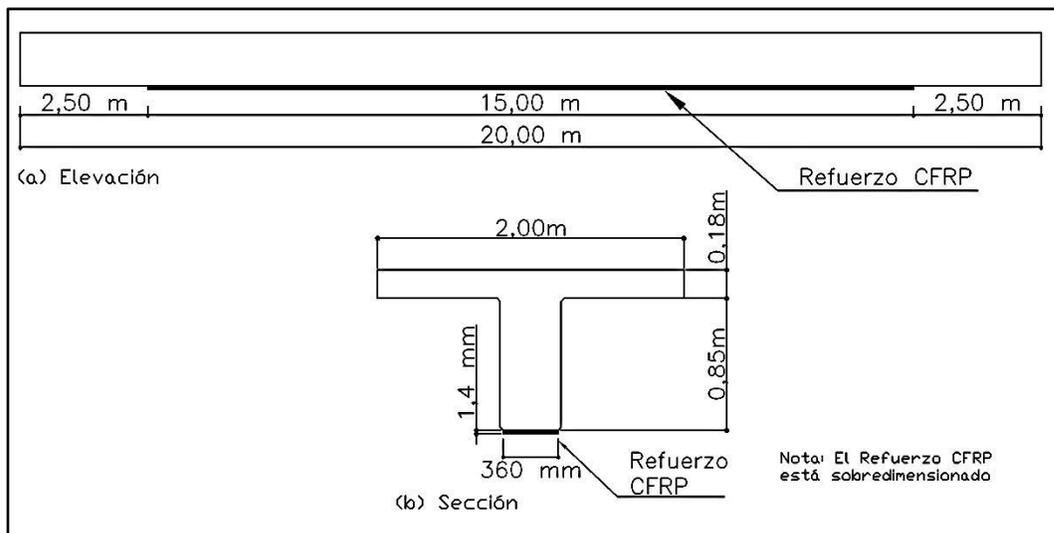
Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2012.

Sumando l_{df} a la ubicación del M_{cr} en cada lado de la viga se obtiene la ubicación donde debe terminar el refuerzo CFRP, a 2,94 metros y 2,52 metros de cada apoyo respectivamente. Esto indica que el refuerzo CFRP termina a

2,52 metros de cada apoyo y que la longitud de la tira de refuerzo CFRP que se colocará en la viga es de 14,96 metros.

Por facilidad de medida y colocación se decide que la longitud del refuerzo CFRP será de 15 metros y que se colocará a 2,50 metros de cada apoyo tal como se indica en las figura 32.

Figura 32. **Detalle refuerzo CFRP**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD 2012.

3.3. Método constructivo de reparación

Los trabajos de reparación se inician limpiando las vigas para quitar la suciedad debida a la contaminación del tráfico y polvo impregnado, esto se hace utilizando una hidrolavadora de alta presión. Seguido se quita el concreto dañado de las vigas utilizando un rotomartillo, esto se hace para que no haya partes flojas y para dar una forma al concreto que permita la correcta

adherencia del concreto nuevo. Seguido se retira el óxido formado en el acero de refuerzo expuesto para detener el proceso de oxidación. Una vez limpio el acero se restituye la cantidad original de refuerzo a flexión y a corte en las vigas que lo necesitan colocando varillas del mismo diámetro que las originales en las vigas que sea necesario.

Una vez colocado el refuerzo se procede a restituir la sección de todas las vigas dañadas, para esto se puede utilizar concreto normal de la misma resistencia que el concreto de las vigas o se puede utilizar grout expansivo de alta resistencia inicial, el cual da la ventaja de poder quitar la formaleta al día siguiente de realizada la fundición permitiendo realizar este trabajo con mayor rapidez. Se debe tener cuidado de aplicar algún producto que trabaje como protección anticorrosiva del acero y otro producto que trabaje como puente de adherencia entre el concreto nuevo y el concreto viejo para garantizar la adherencia correcta.

Terminada la reparación de la viga se comienza el proceso de reforzamiento con fibra de carbono. Para colocar el refuerzo CFRP se debe pulir la superficie de concreto de la viga ya reparada para quitar las irregularidades de la superficie, ya que es necesaria una superficie uniforme donde se colocará el refuerzo de fibra de carbono. Debido a que la superficie no siempre es totalmente plana se debe de terminar de nivelar la superficie donde sea necesario, utilizando un pasta epóxico para llenar los agujeros y emparejar la superficie.

Ya con la superficie nivelada se procede a colocar el refuerzo de fibra de carbono a flexión o corte en la ubicación, cantidad y longitud indicada por el diseño de Ingeniero Estructural. El proceso de aplicación del refuerzo de fibra de carbono será detallado en la sección siguiente.

Si se presentan fisuras se debe proceder inyectar las fisuras con resina epóxica de alta fluidez para sellar la grieta y evitar que siga creciendo y afectando la integridad estructural de la viga. El método de inyección y sellado de fisuras no se trata en éste documento, ya que está fuera de su alcance. Es importante recalcar que el sellado de las grietas debe hacerse antes de colocar el refuerzo CFRP.

3.4. Método de aplicación de refuerzo CFRP

El método de colocación del refuerzo CFRP es un proceso sencillo, no requiere mano de obra muy especializada sin embargo requiere poner atención a detalles y procedimientos específicos para que trabaje de manera adecuada una vez colocado. Por ejemplo, detalles como tiempo de vida de la mezcla de los adhesivos epóxicos, calidad de la superficie, alineación del refuerzo, manejo de los materiales y medidas de seguridad. Se describirá la colocación de refuerzo CFRP tipo platina como refuerzo a flexión y refuerzo CFRP tipo tejido como refuerzo a corte.

3.4.1. Preparación de la superficie

Para colocar los dos tipos de refuerzo, el tipo platina y el tipo tejido de fibra de carbono, sobre el concreto este tiene que cumplir con ciertos requisitos de preparación de su superficie para garantizar una adherencia adecuada entre el refuerzo de fibra de carbono y el concreto, estos son:

- Superficie limpia, libre de polvo, grasas, pintura, cernidos, protectores o cualquier cosa que impida el contacto directo con el concreto.
- Superficie no debe contener partes de concreto flojas.
- Superficie seca o un poco húmeda.

- La desviación máxima de la superficie puede ser de 2 milímetros por cada 30 centímetros.
- La edad mínima del concreto debe ser de 28 días.
- Superficie plana, sin rugosidades o protuberancias mayores de 0,5 milímetros de existir deben ser removidas por desbaste (copa de diamante).
- Si hay secciones cóncavas que excedan una longitud de 1 metro y una profundidad de 5 milímetros, se deben nivelar, ya que puede desarrollar esfuerzos de tensión normales al adhesivo del refuerzo CFRP que pueden provocar delaminación y reducir la efectividad del refuerzo CFRP.
- Esquinas deben ser redondeadas con un radio mínimo de 10 milímetros, para el refuerzo a corte, ya sea por desbaste (copa de diamante) o aplicando algún tipo de mortero epóxico.
- Toda grieta mayor de 0,3 milímetros debe ser sellada e inyectada con resina epóxica.
- Los agujeros bajo la superficie del concreto deben ser reparados antes de colocar el refuerzo, ya que disminuyen la resistencia del concreto en el área de adherencia.
- agujeros en la superficie deben ser llenadas con mortero epóxico para nivelarla.

3.4.2. Mezcla de las resinas epóxicas

Cada resina epóxica tiene sus propias indicaciones para su mezclado, las cuales se indican en su hoja técnica respectiva. Como normas generales se pueden citar las siguientes:

- Toda mezcla debe hacerse según indicaciones de la hoja técnica del fabricante.

- Todos los componentes de la resina deben estar a la temperatura adecuada.
- Los componentes deben ser mezclados en la proporción correcta con un taladro de bajas revoluciones (500 revoluciones por minuto) hasta tener una mezcla uniforme, normalmente los componentes tienen colores diferentes, para que al mezclarlos de manera adecuada se obtenga un color uniforme sin trazas de ningún otro color.
- Los componentes de la resina deben ser mezclados durante el tiempo indicado y verificarse la uniformidad de color.
- La mezcla de la resina debe ser hecha en cantidades que se utilizarán durante el tiempo de vida de la mezcla para no perder o desperdiciar producto.
- No utilizar resina que haya excedido el tiempo de vida de la mezcla, ya que su viscosidad continuará aumentando, afectando de manera negativa la habilidad de la resina para penetrar en el concreto o saturar el tejido de del refuerzo de fibra de carbono.

3.4.3. Normas de seguridad

Por ser productos químicos el contacto con la piel, ojos o vías respiratorias puede ser perjudicial, por lo que se recomienda utilizar lentes protectores, mascarillas para posibles gases que puedan aparecer y guantes para manipular las resinas epóxicas.

3.4.4. Aplicación de refuerzo CFRP a flexión

El método de aplicación variará un poco según las especificaciones técnicas del fabricante. Normalmente el proceso indica que se debe aplicar una capa de resina epóxica sobre la superficie donde se aplicará el refuerzo CFRP,

debe ser una capa uniforme de 1 milímetro de espesor, y debe ser protegida del polvo, humedad u otro contaminante mientras no se coloque el refuerzo.

Figura 33. **Refuerzo CFRP tipo platina para flección**

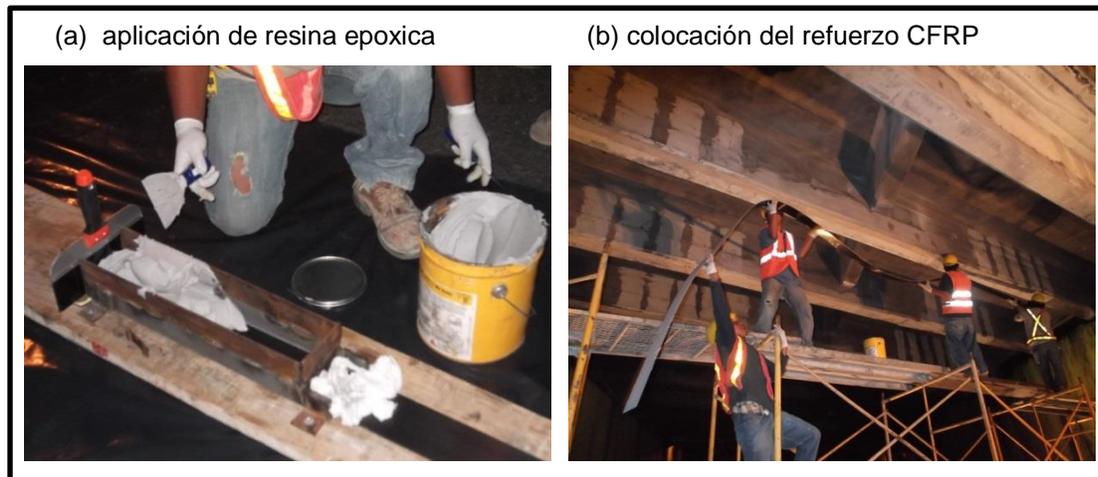


Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Mientras se coloca la resina epóxica sobre la superficie de la viga se debe aplicar una capa uniforme de 1 a 2 milímetros de espesor de resina sobre el refuerzo CFRP evitando que se contamine con polvo o suciedad, eso se hace utilizando una especie de caja para una aplicación uniforme, tal como se aprecia en la figura 34 (a).

Una vez aplicada la resina epóxica en el refuerzo CFRP y en la superficie de la viga se procede a colocar el refuerzo CFRP sobre la resina epóxica aplicada en la superficie presionándolo hasta que la resina epóxica salga por los ambos lados del refuerzo, una vez colocado se retira el exceso de resina epóxica. Este proceso se repite cada vez que se coloque el refuerzo CFRP como se muestra en la figura 34 (b).

Figura 34. **Aplicación de resina epóxica a refuerzo CFRP**



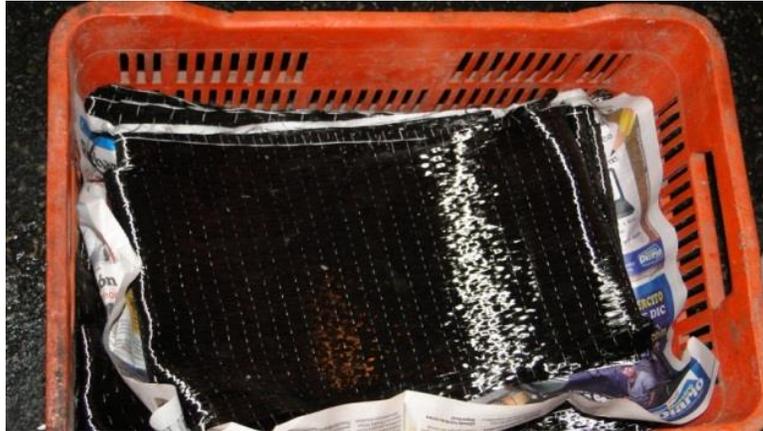
Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

3.4.5. **Aplicación de refuerzo CFRP a corte**

El refuerzo CFRP a corte es de tipo tejido de fibra de carbono, lo que quiere decir que es un entramado unidireccional de fibra de carbono. El método de aplicación requiere que se aplique la resina epóxica en la superficie donde se colocará el refuerzo CFRP, así como en el refuerzo CFRP.

Para aplicar la resina epóxica en el refuerzo CFRP se necesita un soporte donde primero se aplica la resina epóxica con una brocha o paleta, el refuerzo CFRP se coloca en la dirección adecuada sobre el soporte con la resina epóxica aplicada, con el propósito de embeber totalmente el refuerzo CFRP en la resina epóxica. Tal como se ve en la figura 36. Para facilitar su colocación, el refuerzo CFRP se enrolla en un tubo para poder facilitar su colocación tal como se ve en la figura 37.

Figura 35. **Refuerzo CFRP tipo tejido de fibras de fibra de carbono**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Figura 36. **Aplicación de la resina epóxica en el refuerzo CFRP**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Figura 37. **Preparación del refuerzo CFRP embebido de resina epóxica**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

La colocación del refuerzo se hace pegando un extremo del refuerzo CFRP en la superficie y desenrollando el refuerzo CFRP sobre toda la superficie como se muestra en la figura 38, cuidando que quede alineada, sin arrugas o dobleces ni bolsas de aire.

Debe tenerse cuidado de colocar el refuerzo CFRP correctamente alineado, ya que una variación tan pequeña como de 5 grados de la orientación del diseño puede reducir sustancialmente la resistencia y su módulo de elasticidad. Esto implica que debe manipularse e instalarse de manera que la orientación y la alineación se mantengan y se eviten arrugas, ondulaciones y dobleces.

Ya colocado el refuerzo CFRP se debe aplicar una capa de protección contra la intemperie para protegerlo de los rayos UV del sol, alta temperatura, alta humedad, vandalismo, contacto directo con la lluvia, ya que esto deteriora el refuerzo con el pasar del tiempo.

Si el ambiente que rodea el área de trabajo durante la colocación del refuerzo CFRP presenta tierra, polvo, lluvia, luz solar directa, alta humedad o vandalismo que pueda dañar el refuerzo CFRP, este se debe proteger con plástico mientras se instala y termina el proceso de curado de la resina epóxica. Si se apuntaló la estructura para aliviar los esfuerzos de la carga viva y muerta, éste se debe de remover hasta que el proceso de curado de la resina epóxica haya terminado.

Figura 38. **Colocación del refuerzo CFRP a corte**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

3.4.6. Detalles de colocación

A fin de reducir la falla por delaminación o por falta de adherencia del refuerzo CFRP a flexión se deben seguir los siguientes lineamientos:

- No colocar refuerzo CFRP continuo en esquinas internas como intersecciones de vigas con la losa.

- Proveer un radio mínimo de 13 milímetros cuando el refuerzo es colocado alrededor de esquinas.
- Proveer una adecuada longitud de desarrollo.
- Proveer suficiente traslape cuando hayan empalmes de refuerzo CFRP.

La falla por delaminación del refuerzo CFRP en sus extremos se debe a los esfuerzos normales allí desarrollados, que son mayores que en otras áreas del refuerzo CFRP. Esta falla se puede mitigar usando anclajes en los extremos, estos anclajes son estribos de refuerzo CFRP colocados transversalmente según se muestra en la figura 40 o minimizando los esfuerzos de los extremos del refuerzo CFRP colocándolos lo más cerca posible de las zonas de momento cero siendo en este caso los apoyos. Los anclajes deben colocarse cuando el esfuerzo de corte factorado en el extremo es mayor de $2/3$ que el esfuerzo del concreto ($V_u > 0,67V_c$).

Donde:

V_u = esfuerzo de corte factorado

V_c = esfuerzo de corte en el concreto

Figura 39. **Anclajes en extremos de refuerzo CFRP**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

4. LIMITACIONES EN LA APLICACIÓN DE FIBRA DE CARBONO PARA LA REPARACIÓN DE PUENTES

Todo material y técnica de reparación de estructuras tiene sus ventajas, desventajas y limitaciones, y la fibra de carbono no es la excepción. Es de resaltar que tiene muchas ventajas con respecto a otros materiales, entre ellas el poco peso, altas propiedades mecánicas, facilidad de instalación, resistencia al medio ambiente, buena apariencia externa una vez colocado, poco o ningún mantenimiento, aplicable en varios tipos de superficies y su presentación en casi cualquier longitud, lo que lo hace una excelente opción para reforzar y reparar todo tipo de estructuras, especialmente puentes.

La fibra de carbono tiene varias desventajas, que al comparar con los demás métodos y materiales aún se puede considerar una buena opción, se pueden mencionar las siguientes:

4.1. Alto costo del material

Debido a que su proceso de fabricación es largo y complicado, pues requiere que la materia prima poliacrilonitrilo (PAN) sea calentado a temperaturas entre 1 000 y 2 500 grados centígrados en una atmósfera inerte varias veces en sus diferentes etapas de fabricación, estas son: estabilización, carbonización, grafitización y tratamiento de superficie. La resina epoxi que utiliza para adherirlo a la superficie es un polímero termoestable especial de alta resistencia, que al trabajar en conjunto con la fibra de carbono producen el funcionamiento esperado.

4.2. Baja resistencia transversal

La fibra de carbono está hecha por fibras unidireccionales, por lo que al aplicar esfuerzos transversales esta se rompe con facilidad, como se puede ver en la siguiente figura, donde el refuerzo CFRP fue roto por un golpe, teniendo que sustituir el refuerzo en la viga;

Figura 40. Daño de refuerzo CFRP



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

4.3. Diseño especializado

Su diseño está normado por el código ACI 440.2.R-08, donde se encuentran los criterios y guía para su diseño y colocación, lo que requiere estudios adicionales para poder diseñar este tipo de refuerzo.

4.4. Resistencia mínima de la superficie de aplicación

Debido a que el refuerzo CFRP se adhiere a la superficie del concreto, existe una transferencia de esfuerzos del concreto hacia el refuerzo CFRP. La superficie debe tener suficiente resistencia a tensión directa y a corte para que la transferencia de esfuerzos sea de forma adecuada. La resistencia mínima a tensión directa debe ser de 1,4 mega pascales (200 libras sobre pulgada cuadrada) determinado por el ensayo Pull-Off (ASTM D4551), y el f'_c mínimo debe ser de 17,5 mega pascales (2 5000 libras sobre pulgada cuadrada).

4.5. Preparación especial de la superficie de aplicación

La superficie debe de estar totalmente lisa, libre de polvo o grasas, para asegurar una correcta adherencia del refuerzo CFRP mediante la resina epóxica. Toda protuberancia o imperfección debe ser removida, los agujeros deben ser tapados con concreto o epóxico, secciones convexas muy extensas deben de nivelarse ya que provocan esfuerzos adicionales que podrían despegar el refuerzo CFRP. Cuando se aplica refuerzo envolviendo secciones de vigas, las esquinas deben de ser redondeadas con una curvatura de 13 mm diámetro. Las fisuras existentes deben ser inyectadas con epóxico antes de colocar el refuerzo CFRP.

4.6. Resistencia mínima de las estructuras

La filosofía de diseño establece una resistencia mínima de la estructura a reforzar, para asegurar que al momento de ser dañado el refuerzo CFRP la estructura reforzada pueda resistir sobrecargas sin colapsar y permita la reparación del refuerzo CFRP sin peligro. La ecuación que establece el límite es:

$$\phi R_n \geq 1,1S_{DL} + 0,75S_{LL}$$

Donde:

R_n = resistencia nominal del elemento estructural existente

ϕ = factor de reducción

S_{DL} = efectos de carga muerta nueva

S_{LL} = efectos de carga viva nueva

También se debe tener en cuenta son que al momento de colocar las tiras de refuerzo CFRP hay que tener cuidado que queden totalmente lisas sin ondulaciones, arrugas, bien alineadas y en esquinas interiores no se debe colocar refuerzo CFRP como se mencionó anteriormente. Debido a que el refuerzo CFRP tiene una deformación lineal elástica hasta su falla, no tiene zona plástica que presente deformación o fluencia del material antes de la falla, reduciendo la ductilidad del elemento reforzado.

5. PRESENTACIÓN REAL DE CASO DE APLICACIÓN DE FIBRA DE CARBONO EN LA REPARACIÓN DE PUENTE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

El caso de aplicación de refuerzo de fibra de carbono que se expondrá es la reparación del puente La Ruedita, ubicado en la entrada a la zona 1 sobre el periférico de la ciudad de Guatemala, reparación que se realizó durante los meses de julio a diciembre del año 2011. El puente La Ruedita presentaba golpes y daños en 7 de las 10 vigas que lo componen debido a golpes por el transporte pesado que transita bajo el puente. Los daños que tenía el puente eran: falta de recubrimiento del acero de refuerzo, falta de acero de refuerzo y concreto en la sección de algunas vigas, mostrando un caso grave en la primera viga del lado de entrada según se muestra en las figuras 41 y 42.

El proceso de reparación que se utilizó para su reparación fue restituir el acero faltante, seguido de la recuperación de la sección de las vigas, preparar la superficie de las vigas para poder colocar el refuerzo de la fibra de carbono y por último cubrir la fibra de carbono con un recubrimiento impermeabilizante para proteger el refuerzo de la intemperie.

Se utilizaron dos tipos de refuerzo de fibra de carbono. Una es un tipo laminado en forma de tiras de 8 metros de largo por 10 centímetros de ancho, colocando tres tiras como refuerzo a flexión, y se utilizó otro refuerzo a base de tejido de fibra de carbono colocando 4 franjas en cada extremo de cada viga, reforzando las 10 vigas del puente.

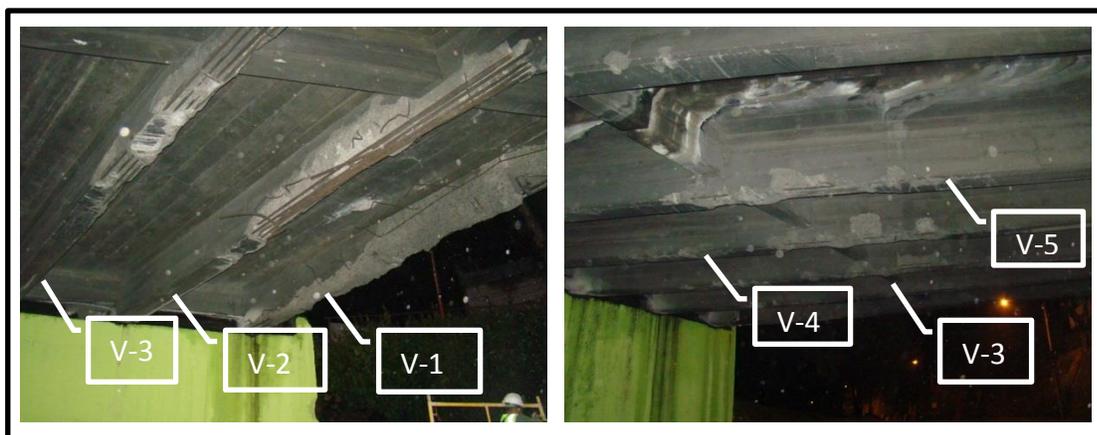
Todos los materiales especiales para el refuerzo y reconstrucción de la viga fueron adquiridos a la empresa Sika Guatemala. A continuación se presenta una secuencia de fotografías del proceso de reparación:

5.1. Daños en las vigas

Se presentan los daños de las 10 vigas el puente. Los resultado de daños

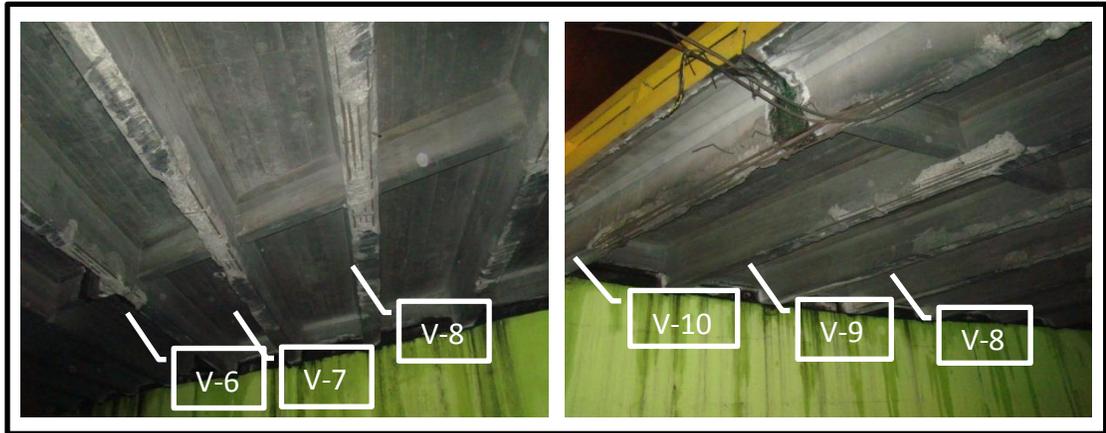
- Viga 1: pérdida total de refuerzo y concreto de la sección de la viga en un tramo de 7 metros de largo.
- Viga 2: daño parcial de sección y daño en el refuerzo.
- Vigas 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9: pérdida de recubrimiento del acero en una parte de la viga.
- V 10: pérdida de recubrimiento del acero, acero roto y falta del mismo en una sección de la viga de 4 metros de largo.

Figura 41. Daños de vigas 1, 2, 3, 4, 5



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Figura 42. Daños de vigas 6, 7, 8, 9, 10

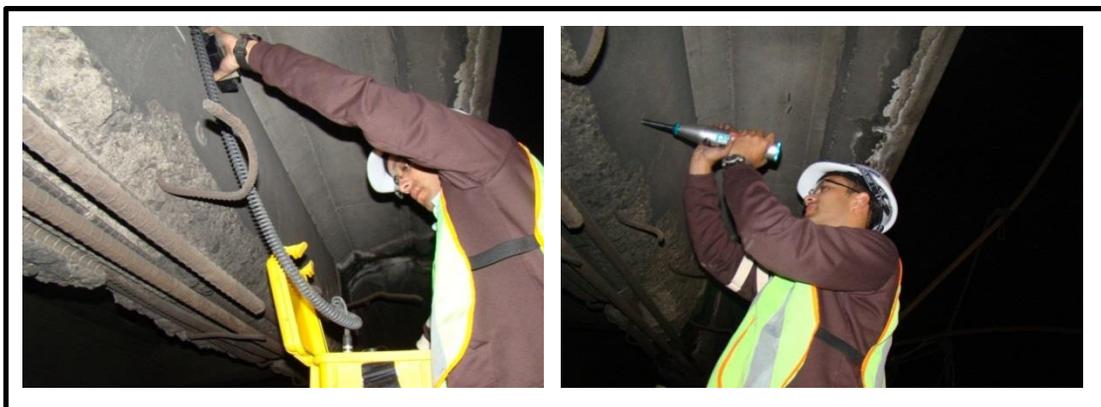


Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

5.2. Ensayos no destructivos

Se localizó del acero de refuerzo con el radar R-METER MK III y se realizaron ensayos de índice de rebote con el martillo esclerométrico (ASTM C805) y según se muestra en la figura 43.

Figura 43. Ensayos no destructivos



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Se encontraron 4 barras número 10 y 4 barras número 9 como refuerzo a flexión, y estribos número 4 a cada 0,65 metros y dos varillas número 4 al centro de la sección de la viga. Se ensayaron muestras de barras de acero para determinar su resistencia a tracción obteniendo como resultado que son grado 40 las barras y la resistencia promedio del concreto es de 33 mega pascales (4 700 libras sobre pulgada cuadrada).

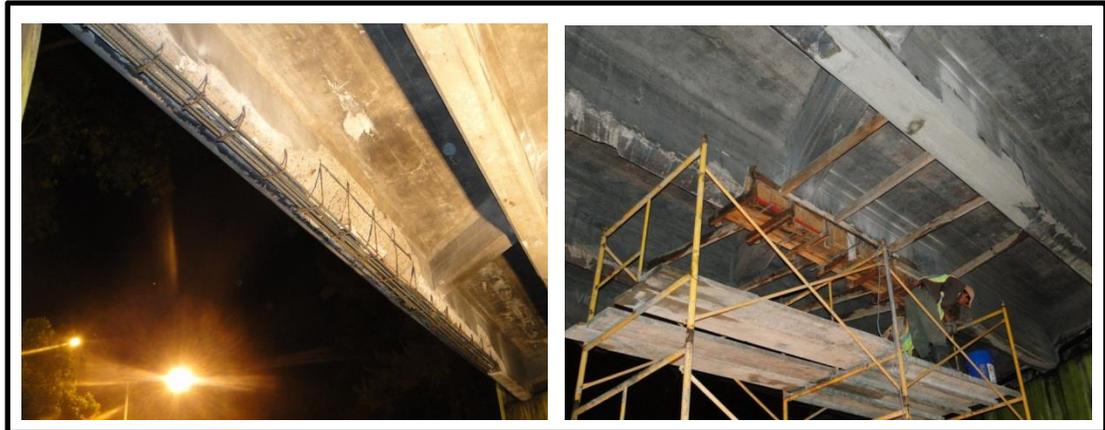
Figura 44. **Limpieza de suciedad y remoción del óxido.**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Antes de realizar la fundición se retiró el óxido del acero de refuerzo y la suciedad de la viga como se muestra en la figura 44. Para la reconstrucción de la sección de la viga se utilizó Sika Grout, el cual es un mortero expansivo de alta resistencia, que permite poder quitar la formaleta al día siguiente y poder avanzar en la fundición de las demás secciones de las vigas dañadas. Se utilizó SikaTop Armatec 110 Epocem como puente de adherencia entre concreto nuevo y viejo, además de trabajar como capa anticorrosiva. En la figura 45 se puede ver el antes y después de la reconstrucción de la viga.

Figura 45. **Recuperación de área de acero y recuperación de la sección de concreto de vigas**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

5.3. **Refuerzo con fibra de carbono**

Características del refuerzo de fibra de carbono colocado

Refuerzo tipo Platina para refuerzo a Flexión, SikaCarbodur

- Uso: refuerzo a flexión
- Densidad 1,5 gramos por centímetro cúbico (93 libras por pie cúbico)
- Resistencia a tracción: 2.800 newton por milímetro cuadrado (406 kilo libra por pulgada cuadrada)
- Módulo de elasticidad: 165 000 newton por milímetro cuadrado (23 931 kilo libra por pulgada cuadrada)
- Dimensiones: espesor 1,2 milímetros, ancho 10 centímetros

Refuerzo tipo tejido de fibra de carbono SikaWrap

- Uso: refuerzo a corte
- Peso 225 gramos por metro cuadrado
- Resistencia a tracción: 3 500 newton por milímetro cuadrado (507 kilo libra por pulgada cuadrada)
- Módulo de elasticidad: 230 000 newton por milímetro cuadrado (33 358 kilo libra por pulgada cuadrada)
- Dimensiones: espesor: 1,3 milímetros, ancho: 30 centímetros

Para colocar el refuerzo CFRP se pulió la superficie de la viga para quitar asperezas e irregularidades de la superficie y para terminar de quitar irregularidades se aplicó un adhesivo epóxico llamado Sikadur 31 HMG, como se puede ver en la figura 46.

Para colocar el refuerzo CFRP a flexión SikaCarbodur se utilizó la resina epóxica Sikadur 30, esta resina se aplicó en la superficie de la viga donde se coloca el refuerzo y en el refuerzo CFRP. Para colocar el refuerzo de fibra de carbono a corte SikaWrap se utilizó la resina epóxica Sikadur 330, al igual que el SikaCarbodur, esta se aplicó en el refuerzo CFRP y la viga, siguiendo el procedimiento descrito en las secciones 3.4.4 y 3.4.5 según se puede ver en las figuras 47 y 48.

Figura 46. **Preparación de la superficie**



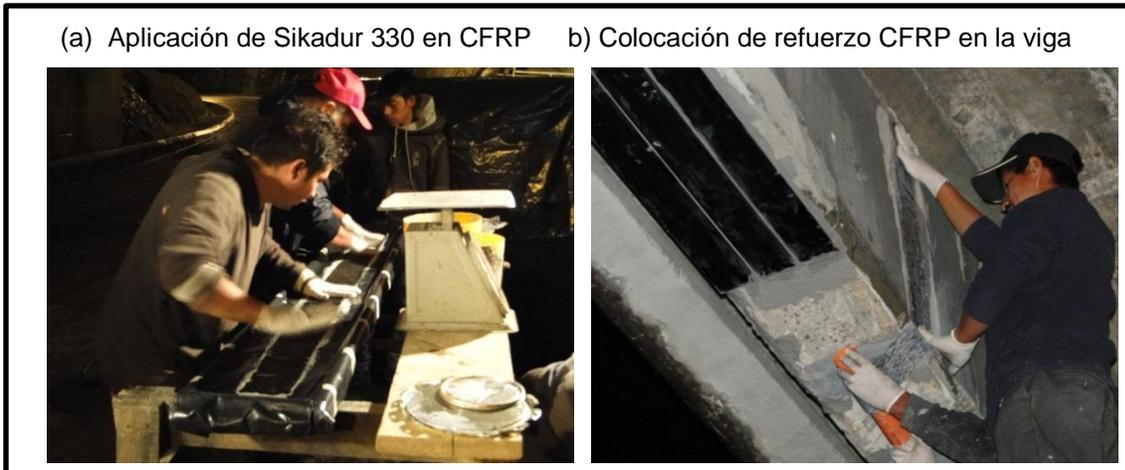
Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Figura 47. **Preparación del platina de refuerzo CFRP**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Figura 48. **Preparación y colocación de refuerzo CFRP tipo tejido**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

5.4. **Sellado de grieta en viga**

La viga 1 se agrietó debido a la pérdida de sección que sufrió y al peso del tráfico que soportaba mientras estaba dañada, por lo que se tuvo que inyectar con epóxico de alta fluidez llamado, Sikadur 52, para sellar la grieta. Esta resina es de alta fluidez se puede inyectar en la grieta por inyección a presión o por gravedad dependiendo de la ubicación de la grieta. En este caso se aplicó por el método de inyección a presión como se ve en la figura 49.

Figura 49. **Sellado de grieta en viga 1**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

5.5. **Protección del refuerzo de fibra de carbono**

Una vez terminado el trabajo de refuerzo de las vigas y sellado de la grieta se aplicó un impermeabilizante al refuerzo para protegerlo contra la intemperie. El impermeabilizante utilizado es Sikatop Seal 107, está hecho a base de cemento y resinas sintéticas. Para darle un color uniforme a las vigas se aplicó una capa de agua-cemento, dejando las vigas de un color gris uniforme. La secuencia de trabajo antes, durante y después se ve en las figuras 50, 51 y 52.

Figura 50. **Vista del refuerzo CFRP colocado en las vigas**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Figura 51. **Aplicación de impermeabilizante sobre el refuerzo de fibra de carbono**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

Figura 52. **Impermeabilizante aplicado sobre refuerzo CFRP**



Fuente: puente La Ruedita, zona 1, ciudad de Guatemala.

CONCLUSIONES

1. El refuerzo CFRP tiene la ventaja de no modificar o incrementar de manera significativa el tamaño de la sección del elemento reforzado evitando agregar carga muerta innecesaria y afectar de manera visual al elemento.
2. El refuerzo CFRP para reforzar elementos con falla a corte, flexión, por falta de confinamiento y elementos preesforzados sin importar su forma.
3. Una desventaja es el cálculo y diseño del refuerzo CFRP, ya que se requieren conocimientos específicos de las propiedades del material CFRP y del comportamiento de la estructura, por lo que solamente una persona debidamente capacitada puede realizar este tipo de diseño.
4. El refuerzo CFRP y los materiales para la colocación tiene la desventaja de tener un alto costo comparado con los métodos tradicionales, siendo compensado por sus ventajas como peso, resistencia a tracción, facilidad de colocación e impacto visual en el elemento reforzado.
5. No todas las estructuras con fallas y daños se pueden reforzar, ya que por seguridad deben poder soportar cierta cantidad de carga adicional por si solas en caso que el refuerzo CFRP sea dañado.
6. El tipo de falla o daño que se puede reparar queda determinado por la capacidad de carga con la que queda la estructura después de la falla

o daño recibido, ya que tiene una condición de carga mínima que debe resistir la estructura.

7. El método de diseño presentado, por ser del ACI, se enfoca principalmente, en estructuras de concreto en general, no exclusivamente en puentes, sin embargo, se pudo aplicar el método y criterios de diseño para cumplir con los requerimientos de la AASHTO para puentes.
8. El diseño del refuerzo CFRP requiere conocer las propiedades del elemento a reforzar, como el f'_c del concreto, f_y , A_s del acero de refuerzo y dimensiones de la sección de la viga, ya que tienen un efecto directo en el método de cálculo.
9. La colocación del material de fibra de carbono es relativamente fácil, pero requiere de una preparación adecuada de la superficie, por lo que no se requiere de personal ni equipo especializado para su colocación. Debe estar siempre bajo la supervisión de un profesional competente y con experiencia.
10. La cantidad de refuerzo de fibra de carbono varía según las propiedades del tipo de refuerzo CFRP a colocar, siendo estas el módulo de elasticidad, resistencia última a tensión, deformación unitaria y espesor.
11. El refuerzo CFRP a flexión es necesario que se coloque a lo largo de la luz de la viga, proveyendo una longitud de desarrollo adecuada pasado el M_{cr} , el cual indica la longitud total requerida de refuerzo CFRP.

RECOMENDACIONES

1. El refuerzo de fibra de carbono una vez colocado debe ser protegido contra la intemperie, pues se daña fácilmente si es sometido a un esfuerzo perpendicular a la dirección de la fibra.
2. Debido a que la resina epóxica es el único puente de unión entre la superficie del elemento y el refuerzo CFRP, se debe preparar la superficie de forma adecuada, especialmente asegurarse que esté libre de polvo o grasa.
3. El refuerzo CFRP se colocar de manera adecuada el refuerzo, totalmente recto, sin arrugas o dobleces.
4. Antes de colocar el refuerzo se deben sellar todas las grietas del elemento que se refuerza, ya que debe ser una estructura monolítica donde se coloque el refuerzo CFRP.
5. Usar equipo de protección adecuado para la manipulación de los productos, ya que pueden ocasionar daños al contacto con la piel, ojos o al inhalar los gases producidos.
6. Utilizar las resinas epóxicas dentro de su tiempo de vida antes de endurecerse para asegurar una buena adherencia del refuerzo CFRP y el concreto.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highway and Transportation Officials. Subcommittee on Bridges, and Structures. *Manual for Condition Evaluation of Bridges..* Washington D.C. Estados Unidos: AASHTO, 1994. 138 p.
2. American Concrete Institute. *Concrete Repair Guide.* 546R-04. Farmington Hills, Michigan. Estados Unidos: ACI, 2004. 53 p.
3. _____ . *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.* 440.2R-08. Farmington Hills, Michigan. Estados Unidos: ACI, 2008. 80 p.
4. BARRERA, Jerónimo H. *Puentes* .Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil, 1996. 84 p.
5. CHEN, Wai; DUAN Lian. “Strengthening and Rehabilitation”. *Bridge Engineering, Construction and Maintenance.* Estados Unidos: Taylorand Francis Group. 2003. 41 p.
6. Concrete Protection Products inc. Fiber Glass Rebar, design codes [en línea] [ref. 03 enero 2012]. Disponible en web: Http://www.fiberglassrebar.com/design_codes.html.

7. Curso de Puentes. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. 2009. 92 p.
8. GUZMÁN ESCOBAR, Ernesto Salvador. *Reforzamiento de puente concreto utilizando postensado externo*. Trabajo de graduación de postgrado. Universidad del Valle de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 90 p.
9. LLANO URIBE, Carolina. Fibra de carbono. En *Revista Metal actual*. Febrero a abril 2009. Número 11. p.14-15.
10. NAWY, Eduard G. *Concreto reforzado, un enfoque básico*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana. 1998. 434 p. ISBN 0-13-771643-5.