

“USO DE REFUERZOS LAMINADOS CON MATERIALES COMPUESTOS PARA
VIGAS DE CONCRETO REFORZADO DE ESTRUCTURAS EXISTENTES:
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y CASO DE ESTUDIO USANDO FRP”



ESPECIALIZACIÓN EN ANÁLISIS Y DISEÑOS DE ESTRUCTURAS

IC. JUAN CARLOS MARÍN MORALES

Asesor

IC. *MSc.* ROMIS FERNANDO VIDES PEÑA

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
SEDE POSGRADOS MEDELLÍN
NOVIEMBRE 2018

CONTENIDO

	PÁG.
INTRODUCCIÓN	7
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	12
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2.2.1 <i>Objetivo técnico.</i>	12
2.2.2 <i>Objetivo normativo.</i>	12
3 ALCANCE DE LA MONOGRAFÍA	13
4 MARCO TEÓRICO	14
4.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE FRP	14
4.2 USOS DE REFUERZO CON FRP PARA ESTRUCTURAS.....	17
4.3 ADHERENCIA DEL REFUERZO DE FRP A LA ESTRUCTURA.....	17
4.4 CÁLCULO DEL REFUERZO	18
4.5 REFERENCIAS PRELIMINARES DE LA UTILIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	19
4.1 CASOS DE REFORZAMIENTO DE VIGAS Y COLUMNAS ENCONTRADOS EN LITERATURA.	21
5 ESTADO DEL ARTE	21

5.1	BARRAS DE REFUERZO DE FRP.....	21
5.2	LAMINADO FRP "PASIVO" PARA REHABILITACIÓN DE VIGAS	22
5.3	LAMINADOS Y HEBRAS DE PRFV PRETENSADOS PARA LA ADAPTACIÓN DE VIGAS	24
5.4	FRP / VIGAS HÍBRIDAS DE CONCRETO.....	26
5.5	COLUMNAS REFORZADAS CON FRP.....	27
5.6	LAS CARGAS A LARGO PLAZO EN VIGAS REFORZADAS CON FRP.....	28
5.7	REQUISITOS NORMATIVOS	29
5.7.1	<i>Consideraciones de diseño general</i>	<i>30</i>
5.7.2	<i>Reforzamiento de Flexión</i>	<i>32</i>
5.7.3	<i>Reforzamiento de cortante</i>	<i>39</i>
5.7.4	<i>Reforzamiento de los miembros sujetos a fuerza axial.....</i>	<i>44</i>
6	EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UN CASO DE ESTUDIO	47
6.1	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	47
6.2	DISEÑO DE REFORZAMIENTO PARA FLEXIÓN CON LAMINADOS DE FRP	50
6.2.1	<i>Cálculo de las propiedades a tracción del sistema FRP</i>	<i>51</i>
6.2.2	<i>Cargas y momentos correspondientes</i>	<i>51</i>
6.2.3	<i>Procedimiento de diseño para flexión positiva por cargas verticales.....</i>	<i>53</i>
6.3	DISEÑO DE REFORZAMIENTO PARA CORTANTE CON LAMINADOS DE FRP.....	57
6.3.1	<i>Cálculo de las propiedades de Cortante del sistema FRP</i>	<i>60</i>
6.3.1	<i>Procedimiento de diseño para cortante por cargas verticales.....</i>	<i>61</i>
7	CONCLUSIONES.....	63
8	BIBLIOGRAFÍA.....	66

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 REFORZAMIENTO DE VIGA CON LAMINADO DE MATERIALES COMPUESTOS (FUENTE: (RODRIGUEZ J. A.-O., 2001) _____	21
FIGURA 2 ESQUEMA DE SECCIÓN DE VIGA Y GRAFICAS DE CARGA-DEFORMACIÓN (FUENTE: (SAADATMANESH H. , 1994)) _____	22
FIGURA 3 ESQUEMA DE SECCIÓN DE VIGA Y GRAFICAS DE CARGA-DEFORMACIÓN (FUENTE: (SAADATMANESH H. A., 1991)) _____	23
FIGURA 4 ESQUEMA DE SECCIÓN DE VIGA Y GRAFICAS DE MOMENTO-CURVATURA (FUENTE: (SHAHAWY, 1999) _____	24
FIGURA 5 GRAFICAS MOMENTO CURVATURA EN PRUEBA DE VIGA POR LEES Y BURGOYNE (FUENTE: (LEES, 1999)) _____	25
FIGURA 6 ESQUEMA DE SECCIÓN DE VIGA Y GRAFICAS DE CARGA-DEFORMACIÓN (FUENTE: (TRIANAFILLOU, 1992)) _____	26
FIGURA 7 ESQUEMA DE SECCIÓN Y GRAFICAS DE MOMENTO-CURVATURA DE VIGA PROBADA POR SCHNERCH ET AL (FUENTE: (SCHNERCH, 2002) _____	27
FIGURA 8 COLUMNAS PROBADAS POR CHAALLAL Y SHAHAWY (FUENTE: (CHAALLAL O. A., 2000)) _____	28
FIGURA 9 DESACOPLAMIENTO Y DELAMINACIÓN DE SISTEMAS FRP ADHERIDOS EXTERNAMENTE	34
FIGURA 10 PROFUNDIDAD EFECTIVA DE LOS SISTEMAS DE FRP (FUENTE: (ACI-440.2-R17, 2017)) _____	35
FIGURA 11 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA REDUCCIÓN DE LA FUERZA (FUENTE: (ACI-440.2-R17, 2017)) _____	36
FIGURA 12 TENSIÓN INTERNA Y DISTRIBUCIÓN DE TENSIÓN PARA UNA SECCIÓN RECTANGULAR BAJO FLEXIÓN EN ESTADO LIMITE ÚLTIMO (FUENTE: (ACI-440.2-R08, 2008)) _____	38
FIGURA 13 ESQUEMAS TÍPICOS DE LAMINADOS PARA EL FORTALECIMIENTO DE CIZALLADURA. _	40
FIGURA 14 ILUSTRACIÓN DE LAS VARIABLES DIMENSIONALES UTILIZADAS EN CÁLCULOS DE REFUERZO DE CORTANTE PARA REPARACIÓN, REACONDICIONAMIENTO O REFUERZO MEDIANTE LAMINADOS DE FRP(FUENTE: (ACI-440.2-R17, 2017)) _____	42
FIGURA 15 DIAGRAMA DE INTERACCIÓN PARA UNA COLUMNA (FUENTE: (ACI-440.2-R17, 2017))	46

FIGURA 16 DESPIECE DE LA VIGA CONTINUA CON REFUERZO EXTERNO DE FRP. CASO DE ESTUDIO.	47
FIGURA 17 PLANTA ESTRUCTURAL TÍPICA DEL 4° AL 12° PISO. CASO DE ESTUDIO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	48
FIGURA 18 IMÁGENES DEL ELEMENTO DEL CASO DE ESTUDIO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	49
FIGURA 19 SECCIÓN 2-2 DE VIGA EN ZONA DE MÁXIMA FLEXIÓN. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	50
FIGURA 20 SECCIÓN 1-1 DE VIGA EN ZONA DE CORTANTE. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	58
FIGURA 21 VIGA VA-2-6 (50X70) PARA SECCIÓN 1-1 DE CORTANTE LOSA 7 (FUENTE: ARCHIVOS PROPIOS)	58
FIGURA 22 VIGA VA-2-6 (50X70) PARA SECCIÓN DE CORTANTE LOSA 9 CON JUNTA FRÍA POR VACIADO IRREGULAR	59
FIGURA 23 VIGA VA-2-6 (50X70) PARA SECCIÓN 1-1 DE CORTANTE LOSA 9 (FUENTE: ARCHIVOS PROPIOS)	59

INDICE DE TABLAS

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE ALGUNAS FIBRAS DE INTERÉS _____	15
TABLA 2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE ALGUNAS FIBRAS _____	16
TABLA 3 PROPIEDADES DE VARIOS MATERIALES UTILIZADOS EN TUBERÍAS Y DEPÓSITOS _____	16
TABLA 4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ADHERIDOS _____	18
TABLA 5 FACTORES DE REDUCCIÓN AMBIENTAL PARA VARIOS SISTEMAS DE FRP Y CONDICIONES DE EXPOSICIÓN (FUENTE: (ACI-440.2-R17, 2017)) _____	31
TABLA 6 ESFUERZO POR CARGA SOSTENIDA DE SERVICIO EN REFUERZO DE FRP _____	37
TABLA 7 FACTOR DE REDUCCIÓN ADICIONAL RECOMENDADO PARA REFUERZO DE CORTANTE CON FRP _____	41
TABLA 8 PROPIEDADES DE LA SECCIÓN 2-2 DE VA 2-6 (50x70) _____	51
TABLA 9 CARGAS EXISTENTES Y NUEVAS - MOMENTOS EN ZONA DE FLEXIÓN. _____	52
TABLA 10 PROPIEDADES DEL SISTEMA FRP ENTREGADAS POR EL FABRICANTE _____	52
TABLA 11 PROCEDIMIENTO PASO A PASO DE REFORZAMIENTO A FLEXIÓN CON FRP. _____	53
TABLA 12 CONFIGURACIÓN DEL REFUERZO DE CORTANTE FRP SUPLEMENTARIO _____	60
TABLA 13 PROPIEDADES DEL SISTEMA FRP ENTREGADAS POR EL FABRICANTE _____	60
TABLA 14 PROCEDIMIENTO PASO A PASO DE REFORZAMIENTO A CORTANTE CON FRP. _____	61

Resumen

De los posibles usos que puede tener una estructura de concreto reforzado (CR), diferentes a los de diseño, se genera la necesidad de aumentar las cargas vivas consideradas inicialmente que conlleva a un cambio de uso. Por consiguiente, se debe realizar un reforzamiento de vigas o columnas usando cualquiera de las diferentes metodologías existentes para este fin.

La metodología propuesta es el reforzamiento o rehabilitación de elementos estructurales con laminados de materiales compuestos de polímeros reforzados con fibra de carbono (FRP).

Dado que, desde el punto de vista local, el uso de materiales compuestos tipo FRP no está regulado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (normativa sismo resistente vigente) la metodología utilizada, en general, es la guía de la ACI-440.2R-17 donde se especifica que los sistemas de reforzamiento de FRP deben estar diseñados para resistir fuerzas de tracción mientras se mantiene la compatibilidad de la tensión entre el FRP y la superficie del concreto reforzado, pero no está en capacidad de resistir fuerzas de compresión.

No se está considerando el análisis de deflexiones ni la posible influencia de materiales compuestos tipo FRP en la respuesta a corto y/o largo plazo de los elementos que se intervendrían con el compuesto mencionado. También, que los requisitos expuestos a continuación no aplican a sistemas FRP usados para mejorar la resistencia a la flexión y/o cortante en las zonas que se espera la articulación plástica de momentos dúctiles en los elementos de pórticos de concreto reforzado que resisten cargas sísmicas.

Se ha analizado una viga de una edificación de 12 pisos de concreto reforzado tipo pórtico, donde hubo un incremento de la carga viva por cambio de uso, que fue diseñada y construida bajo la vigencia de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR98.

Palabras Claves

Reforzamiento; Resistencia; Tensión; Vigas; Momento; Cortante; Flexión: Materiales Compuestos; Concreto Reforzado (CR); Polímeros Reforzados con Fibras (FRP);

Introducción

El reforzamiento de estructuras existentes con materiales compuestos se ha convertido en una gran alternativa por ofrecer grandes ventajas con respecto a las técnicas de reforzamiento convencionales. Las grandes ventajas de esta técnica son: el poco peso, su facilidad de aplicación, su alta resistencia y que no modifica la geometría original de los elementos permitiendo conservar la arquitectura inicial de la estructura reforzada.

Existen, sin embargo, ciertos inconvenientes que limitan su uso; uno de ellos es que se produce una degradación de sus propiedades a temperaturas no muy elevadas a lo largo del tiempo. De igual forma, presentan unos coeficientes de dilatación muy diferentes de los del concreto o el acero. Además, no se tiene información suficientemente de su interacción con otros materiales, por consiguiente, solo se cuenta con la reglamentación de códigos internacionales como la ACI 440 y 440 2R y no una ley como sí lo son otros estándares, por ejemplo, el Reglamento NSR-10.

A pesar de los diferentes estudios que han originado una amplia gama de formulaciones que permiten adecuar sus características, no se tiene una estandarización o especificaciones de criterios de control de recepción o de calidad. Adicionalmente, su precio unitario es elevado,

aunque esto puede compensarse teniendo en cuenta otros aspectos que pueden hacerlos competitivos en el costo total de la intervención.

El uso de laminados con materiales compuestos como los Polímeros Reforzados con Fibras (FRP) son de gran importancia en la Ingeniería Civil, particularmente en la adaptación de estructuras existentes en la industria de la construcción actual. Esto es una consecuencia de las necesidades de tener estructuras más ligeras, esbeltas, resistentes a la corrosión y más económicas. Por ejemplo, debido al deterioro y la relativa vida útil corta, y los altos costos de mantenimiento de las estructuras viales existentes, los Departamentos de Transporte (DOT) en todos los Estados Unidos son muy activos en el uso de materiales compuestos en la construcción. Muelles hechos de tubos de FRP llenos de concreto, muelles revestidos con envolturas de FRP, vigas de FRP híbridas y vigas de soporte hechas también de materiales compuestos, vigas rectangulares y en T reforzadas con barras de FRP, vigas pretensadas con tendones de FRP adheridos o no adheridos y columnas pretensadas con los tendones de FRP ahora se usan comúnmente.

En este estudio se realizarán ejemplos de modelos de reforzamiento con laminados de materiales compuestos con FRP para solicitaciones por cargas gravitacionales, enfocándose únicamente en vigas de concreto reforzado. A estos elementos se les realizará el diseño por cortante y por flexión considerando refuerzo conformado por láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP), que adheridas al exterior del elemento estructural sirve para mejorar su resistencia a flexión, cortante (o compresión, si fuese el caso).

1 Planteamiento del Problema

1.1 Antecedentes

Existen diferentes formas e incontables metodologías para enfrentar un problema: se puede hablar de realizar una inspección visual y superficial del mismo con la posibilidad que se den alternativas de solución basadas sólo en un diagnóstico. Como también, que no esté soportado mediante una buena justificación técnica, llevando a no tener una adecuada ilustración y desarrollo del mismo que arrojaría resultados insuficientes o poco eficaces.

Afortunadamente, la ciencia ha dotado al investigador de hoy con una rama un poco compleja por todas las cantidades de variables que intervienen, pero muy gratificante por los resultados obtenidos, esta rama es la patología, “La patología del griego, estudio (*logos*) del sufrimiento o daño (*paethothos*)- es la parte del estudio de las enfermedades en su particular sentido, es decir, como procesos o estados anormales de causas conocidas o desconocidas”¹, a pesar que es un concepto muy relacionado a la biología, es ampliamente utilizado en diversas profesiones, en nuestro caso particular en lo que respecta a la evidencia de posibles fallas estructurales que después de un análisis de vulnerabilidad requieran y permitan ser reparadas mediante un reforzamiento.

1.2 Formulación del Problema

El reforzamiento de un elemento estructural de una edificación existente es requerido por la evidencia de posibles daños puntuales que son originados por cambio de uso o un aumento de cargas que pueden ser reparados mediante reconstrucción o reforzamiento. La técnica

¹ Disponible en internet: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Patología>>

convencional de recrecidos o aumento de secciones involucran alteración de la arquitectura original y un aumento del peso de la estructura, lo cual, implicaría un reforzamiento de la cimentación respectiva, así como la suspensión de la actividad de la edificación para hacer dicho reforzamiento. La otra técnica de reforzamiento convencional es la adhesión de pesadas placas de acero cuyo procedimiento requiere de perforaciones en el concreto existente para colocar las diferentes platinas y equipos de soldadura, así como el uso de un equipo de carga especializado para el transporte horizontal o vertical de las placas.

Adicionalmente, la norma actual vigente NSR-10 no especifica la reglamentación y su respectiva legalización sobre diseño del reforzamiento de estructuras con laminados de materiales compuestos. Por lo tanto, los posibles estudios y diseños existentes que se realicen de reforzamientos con laminados de materiales compuestos con FRP se deben utilizar como guía otros códigos internacionales, como lo son el ACI-440 y 440 2R estadounidense y el FIB-2000 europeo.

Expuesta la situación anterior, en este trabajo se profundizan en las recomendaciones que se presentan en estándares y se determinan cuáles pueden ser las más adecuadas para la utilización, en el medio local, para los reforzamientos de elementos estructurales de edificaciones con laminados de materiales compuestos con FRP.

2 Objetivos de la Investigación.

2.1 Objetivo General

El objetivo general del proyecto es presentar algunos de los diferentes métodos que existen en la actualidad para el reforzamiento de vigas y columnas con laminados de materiales compuestos en estructuras de concreto reforzado existentes.

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1 Objetivo técnico.

— Realizar una revisión bibliográfica para conocer las técnicas de aplicación de refuerzos con laminados con materiales compuestos de FRP de acuerdo con la patología, el tipo de elemento estructural, su forma de colaborar con la estructura existente y los mecanismos de falla.

— Conocer algunos de los diferentes estudios que existen para el reforzamiento de columnas y vigas en estructuras de concreto reforzado con laminados de materiales compuestos y los modelos de reglas de buena práctica en la elección y en la correcta aplicación de los materiales de refuerzo y de los laminados adheridos estudiados en el proyecto.

2.2.2 Objetivo normativo.

— Analizar las recomendaciones dadas en guías y estándares internacionales con respecto a la utilización de FRP y comparar con las disposiciones del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

— Presentar un ejemplo de diseño para un caso de estudio de una viga de concreto reforzado, de tal forma que la revisión y aplicación del proyecto sea una guía para el procedimiento de diseño.

3 Alcance de la monografía

Generalmente, el uso de laminados de materiales compuestos tipo FRP para reforzamientos en estructuras existentes de concreto reforzado está ligado a situaciones donde se evidencian fisuras (normalmente causadas por cargas de servicio u otras acciones) en algunos elementos estructurales, tales como vigas, columnas, uniones viga-columna, muros, etc., o cuando se predice qué acciones sísmicas reglamentarias pueden ocasionar fallas o daños severos en dichos elementos o en sus conexiones.

Este trabajo se limitará a analizar una viga de una edificación existente denominada caso de estudio. A este elemento se le realizará el diseño de una posible intervención estructural por flexión y cortante, debidas a solicitaciones de servicio, con materiales compuestos laminados con polímeros reforzados de carbono (CFRP), presentando los cálculos numéricos asociados al procedimiento de diseño según las recomendaciones y lineamientos dados en diferentes estándares internacionales, especialmente los contenidos en el ACI 440.2-R.

Es de aclarar que lo presentado en este estudio no considera análisis de deflexiones ni la posible influencia de materiales compuestos tipo FRP en la respuesta a corto y/o largo plazo de los elementos que se intervendrían con el compuesto mencionado, ni tampoco la influencia de altas temperaturas (producto de incendios) en los laminados tipo FRP.

4 Marco Teórico

Los materiales compuestos, formados por dos o más materiales de características diferentes que se tratan de combinar, son usados desde mucho tiempo atrás en el área de la construcción. Como ejemplos típicos pueden citarse la tapia o el mismo concreto estructural. Los nuevos materiales compuestos empleados en el sector de la construcción, formados por fibras (carbono, aramida, etc.) adheridos en una matriz orgánica (poliéster, epoxi, etc.) se caracterizan por su ligereza (del orden de $1,6 \text{ g/cm}^3$), lo cual aporta ventajas tanto desde el punto de vista de económico y facilidad en el transporte, como la facilidad de su aplicación y limpieza en su montaje y puesta en obra.

Presentan un buen comportamiento ante la corrosión y el ataque de agentes ambientales, lo cual, supone una ventaja en aplicaciones costeras, marinas y, en general, en todos aquellos ambientes que sean agresivos, siendo su mantenimiento prácticamente nulo. Otra de sus particularidades es la de poseer buenas características mecánicas y, en particular, elevada resistencia mecánica, tanto a tracción como a compresión, a cizalladura y resistencia al impacto. Además, no producen interferencias con campos electromagnéticos, lo que les hace insustituibles en algunas aplicaciones.

4.1 Propiedades Mecánicas de FRP

Los polímeros reforzados con fibra (FRP) de carbono parecen los más idóneos para su uso en refuerzo o rehabilitación de elementos de estructurales en estructuras concreto reforzado. Para tener un orden de magnitud de sus características, considérese el ejemplo de una lámina unidireccional con fibras en la dirección axial. Pueden ser descritas básicamente por:

Tabla 1
Características mecánicas de algunas fibras de interés

Propiedad	Unidad
Resistencia	1.482 MPa
Módulo elástico	115.34 MPa
Densidad	1.48 g/cm ³
Coefficiente dilatación térmica (long.)	0.23x10 ⁻⁶ m/°C
Coefficiente dilatación térmica (transv.)	34.1x10 ⁻⁶ m/°C

Datos obtenidos de Bibliografía (fuente: (Recuero Alfonso, 1997))

En la Tabla 1 pueden verse características mecánicas de algunas fibras de interés para materiales compuestos de uso estructural. Estos materiales proporcionan la posibilidad de entremezclar fibras y sistemas de matrices e incluir otros tipos de fibras (fibras híbridas), creando un amplio campo de aplicación.

Las características de estos materiales dependen, principalmente, del tipo, riqueza y orientación de las fibras, pero también de la matriz y del proceso de curado. Para situar el orden de magnitud, en la tabla 2 pueden verse algunos datos comparativos de las características de materiales utilizados en construcción.

Comportamiento a la tracción: cuando se carga en tensión directa, los materiales FRP unidireccionales no exhiben ningún comportamiento plástico antes de la ruptura. El comportamiento de tracción de los materiales de FRP que consisten en un tipo de material de fibra se caracteriza por una relación lineal elástica-tensión-deformación hasta la falla, que es repentina y quebradiza.

Tabla 2
Propiedades Mecánicas de Algunas Fibras

VIDRIO E	
Diámetro del Hilo (mm)	10-20
Tensión Rotura (GPa)	3.6/2.6-3.4
Módulo Tracción (GPa)	76
Tensión Rotura Específica (GPa)	1.40/1.34
Módulo Específico	29
Densidad (g/cm ³)	2.56/2.55
Coefficiente de Expansión Térmica (10 ⁻⁶ /°C)	4.9
Calor Especifico kJ/kg K	0.7
KEVLAR 29	
Tensión Rotura (GPa)	2.76
Módulo Tracción (GPa)	58
Tensión Rotura Específica (GPa)	1.92
Módulo Específico	40
Densidad (g/cm ³)	1.44
KEVLAR 49	
Tensión Rotura (GPa)	2.94/3-3.6
Módulo Tracción (GPa)	128
Tensión Rotura Específica (GPa)	2.48/2.03
Módulo Específico	90
Densidad (g/cm ³)	1.45
Diámetro del Hilo (mm)	12

Datos obtenidos de Bibliografía (fuente: (Recuero Alfonso, 1997)

Tabla 3
Propiedades de varios materiales utilizados en tuberías y depósitos

Tipo de Material	Densidad D (g/cm³)	Coefficiente de Dilatación.	Tracción (MPa)	Compresión (MPa)
Hormigón	2.1-2.2	12x10 ⁻⁶	---	20-40
Hierro	7.85	12x10 ⁻⁶	220-400	220-400
Resina Poliéster	1.2-1.4	80-100x10 ⁻⁶	45-60	150-200
Fibra de Vidrio	2.55	4.6x10 ⁻⁶	3500	---
Composite	1.5-2.1	1.25x10 ⁻⁶	120-600	---

Datos obtenidos de Bibliografía (fuente: (Recuero Alfonso, 1997)

4.2 Usos de Refuerzo con FRP para Estructuras

Se debe resaltar la importancia -cada vez mayor- que tiene el mantenimiento de estructuras, tanto del patrimonio histórico como las recientes. En muchos casos, la relación costo beneficio no se tiene en cuenta frente a la calidad, estética y durabilidad del resultado. En todas las ocasiones es importante reducir las molestias inherentes a la realización de obras en edificios en funcionamiento. La restauración, refuerzo o rehabilitación de elementos estructurales resulta ser uno de los aspectos de mayor interés y especialmente lo relacionado con los nuevos materiales compuestos. La resistencia, ligereza y el comportamiento ante los agentes climáticos y la corrosión hacen que estos materiales sean alternativas óptimas para su utilización en este tipo de intervenciones.

4.3 Adherencia del Refuerzo de FRP a la Estructura

La unión del refuerzo de FRP a la estructura, al igual que con otros tipos de refuerzo, puede hacerse mediante pegado, que es el caso más habitual, o mediante conexiones mecánicas. Estas últimas pueden darse en elementos especiales en los que se refuerza adecuadamente las zonas en que se va a realizar la conexión mecánica (tornillos, pasadores, anclajes, etc.) para que resistan las tensiones producidas.

En la tabla 4 pueden compararse las ventajas y desventajas de las uniones adhesivas frente a las uniones mecánicas. En el caso de fibras o telas pre-impregnadas, el propio monómero de impregnación actuará como pegamento, en tanto que con los elementos fabricados el método habitual de unión con la estructura existente es mediante pegantes especiales. En consecuencia, uno de los aspectos importantes en el uso de estos materiales compuestos es la selección del adhesivo adecuado.

Dado que los materiales para la construcción son de naturaleza muy variada y abarcan concreto, piedra, metales, madera, plásticos, vidrio, etc., existe una diversidad de adhesivos orientados a unirlos, técnica y económicamente, del modo más apropiado.

*Tabla 4
Ventajas y Desventajas del uso de Adheridos*

SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Epoxi	Alta adhesión final. Durabilidad. Cualquier espesor. Contracción del 2%.	Preparación de Superficies. Vida de la Mezcla. Ciclos de Curado.
Poliuretanos	Flexibilidad. Mejor para Plásticos	Menor adhesión final que los epoxis. Desfavorable para cristal y metales.
Acrílicos	Buena adhesión final. Fácil aplicación. Curado Rápido. Preparación de Superficies.	Espesor de la capa. Contracción del 7%. Durabilidad.

Datos obtenidos de Bibliografía (fuente: (ACI-440.2-R17, 2017)

4.4 Cálculo del Refuerzo

Como puede verse en la figura 2, los FRP presentan un comportamiento elástico y lineal hasta rotura, lo cual representa un comportamiento frágil. Por otra parte, la conexión de elementos de estos materiales entre sí o con la estructura anterior suele ser semi-rígida, lo que complica su análisis, llegándose a considerar el uso de tablas. Las reglas de cálculo dependerán del material, de su rigidez, ductilidad y resistencia, además de su adherencia. Así como de las características del ambiente en que va a estar expuesto, etc.

Finalmente, los resultados del proyecto permitirán mejorar el conocimiento de las características de estos materiales, que permitirán proponer formulaciones más adecuadas a los requerimientos propios de su aplicación y adherencia. Con los diferentes comportamientos de las estructuras y los mecanismos de transferencia de cargas entre los elementos estructurales, su comportamiento con el tiempo y las condiciones ambientales y de uso, se pueden evidenciar características para implementar esta metodología de reforzamiento con la respectiva tecnología para su aplicación y puesta en funcionamiento. Con esto se espera abrir en la Industria de la Construcción el uso del reforzamiento con laminados de materiales compuestos de uso estructural ya utilizados en otras industrias (aeronáutica, naval, automovilística, ferroviaria, etc.), estimulando el desarrollo innovador e industrializando las tecnologías de refuerzo, mejorando su fiabilidad, durabilidad y disminuyendo la relación costo beneficio.

4.5 Referencias Preliminares de la Utilización de la Metodología.

- 1) W. TSAI, STEPHEN, "**Theory of Composites Design**", Ed. Think Composites, 1992, USA. Se presentan las bases para el análisis teórico de estructuras de materiales compuestos.
- 2) MIRA VETE, A.: "**Los nuevos materiales en la construcción**", Ed. A. Miravete, 1994, Zaragoza. Se presenta una amplia panorámica de las posibilidades que ofrecen los materiales compuestos en la construcción, con gran número de ejemplos y una descripción de las características de estos materiales.
- 3) NAFEMS Research Working Group Seminar, "**Composites in infrastructure design and rehabilitation**", Ed. V Peshkam, Mouchel Engineering, Science & Technology, November 1995, London U.K. Presenta una serie de consideraciones teóricas, de realizaciones y de estudios

sobre refuerzo de estructuras con materiales compuestos, llevados a cabo en distintos países de todo el mundo.

4) MEIER, URS: "**Advanced composites for structural repair: European perspective**", Advanced Materials and Techniques, pág. 491-503, Barcelona 96. Presenta un análisis de la utilización de los materiales compuestos en la reparación y rehabilitación de estructuras en Europa.

5) **Report on Japan-Canada Workshop on Advanced Composites Materials for Concrete Structures**, marzo 1996. Presenta las conclusiones de la última reunión entre técnicos de Japón y de Canadá para discutir sobre la elaboración de códigos de diseño de estructuras de materiales compuestos.

6) MALVAR, L.J., WARREN G.E. and INABA CM.: "**Composites applications in the Navy Waterfront Infrastructure**". Materials for the New Millenium, 4th ASCE Materials Conference, noviembre 1996, Whashington. Presenta los resultados de la utilización experimental de materiales compuestos en el refuerzo de instalaciones marítimas, realizados en los laboratorios de la Navy, en San Diego, EE.UU.

7) C. BANK LAURENCE et Al.,: "**International Research on Advanced Composites for Construction**", IRACC 96. US Research Proyect. Presenta una amplia relación de los distintos proyectos de investigación sobre el uso de materiales compuestos en construcción, llevadas a cabo en distintas universidades de EE.UU.

8) **Composite structures: conventional and innovative**. L\BSE symposium, Innsbruck, 1997. Presenta aportaciones conceptuales, casos de aplicación y noticia de proyectos en desarrollo en todo el mundo.

9) Materiales Compuestos en la Construcción: Materiales de Construcción, n° 247-248, 1997. En este número de la revista se describen con detalle estos materiales, incidiendo en sus amplias e importantes aplicaciones en la Construcción.

4.1 Casos de Reforzamiento de Vigas y Columnas encontrados en literatura.



Figura 1 Reforzamiento de Viga con laminado de Materiales Compuestos (fuente: (Rodríguez J. A.-O., 2001)

5 Estado del Arte

A continuación, se presenta un breve resumen de los usos principales y la investigación de compuestos de FRP en estructuras de Ingeniería Civil.

5.1 Barras de Refuerzo de FRP

Rebars made of FRP / Barras de refuerzo con FRP-. El uso de barras de FRP como refuerzo regular ha sido analizado y estudiado por muchos investigadores. (Saadatmanesh H. , 1994) estudió los efectos de la cantidad de refuerzo FRP y el tipo de forma de la barra y el acabado superficial en el comportamiento real y la respuesta del concreto. Thériault y Benmokrane [54]

estudiaron los efectos de la cantidad de refuerzo de FRP y la resistencia del concreto en el ancho de la fisura, la resistencia al momento y las deformaciones en el concreto y los refuerzos.

Bogdanovic [6] estudió las deflexiones laterales en vigas reforzadas con barras AFRP.

Thiagarajan [7] estudió la respuesta momento-curvatura, la fuerza del momento y las deformaciones en el hormigón y los refuerzos en vigas reforzadas con barras CFRP.

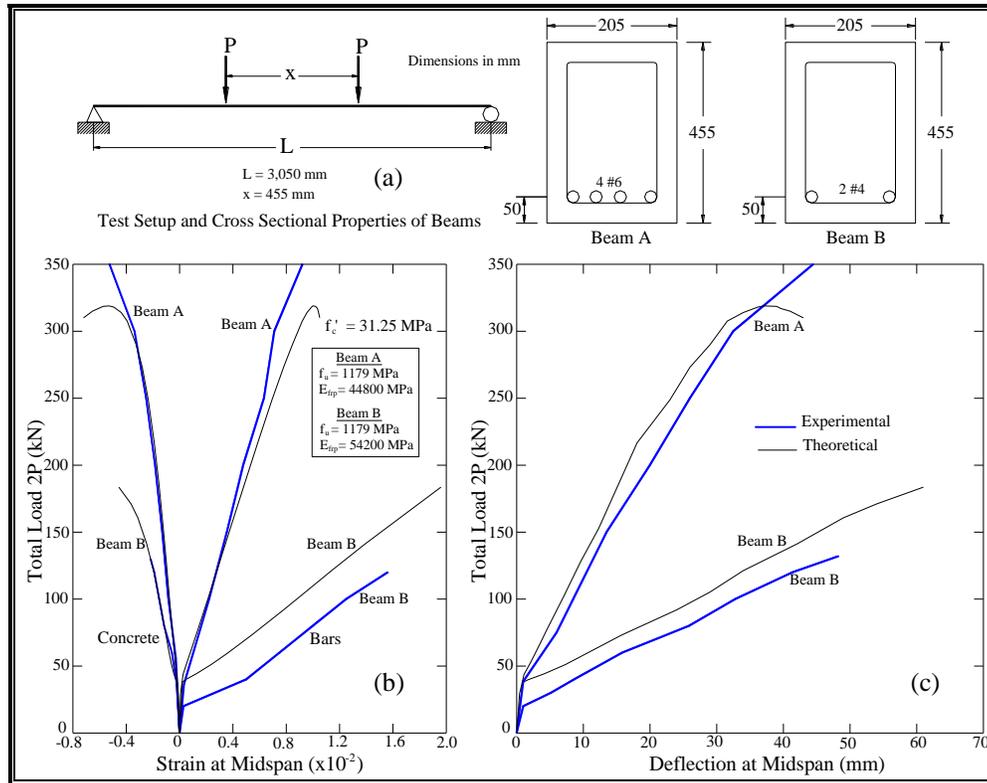


Figura 2 Esquema de sección de Viga y graficas de Carga-Deformación (fuente: (Saadatmanesh H. , 1994))

5.2 Laminado FRP "Pasivo" para Rehabilitación de Vigas

Passive" FRP Laminates for Beam Retrofitting / Laminado FRP "pasivo" para rehabilitación

de vigas. Este es quizás el uso más común de compuestos de FRP en la construcción de hoy.

Saadatmanesh y *Ehsani* [8] y *An et al* [9] llevaron a cabo extensos estudios teóricos y

experimentales sobre el comportamiento de vigas rectangulares y en T reforzadas con laminados

GFRP. *Ross et al* [10] llevaron a cabo estudios teóricos y experimentales en vigas con

laminados de FRP. *Shahawy y Beitelman* [11] y *Ei-Tawil et al* [12] estudiaron la respuesta estática y de fatiga de los haces en T reforzados con laminados CFRP. *Borowicz* [13] llevó a cabo estudios teóricos y experimentales sobre el comportamiento de vigas rectangulares y en T reforzadas con laminados de FRP aplicados mecánicamente. *Ei-Refaie et al* [14] estudiaron el comportamiento y la respuesta de haces continuos reforzados con laminados de FRP. Más recientemente, *Rasheed et al* [15] propusieron un método para calcular deflexiones en vigas compuestas sometidas a cargas distribuidas, uniformes y triangulares distribuidas.

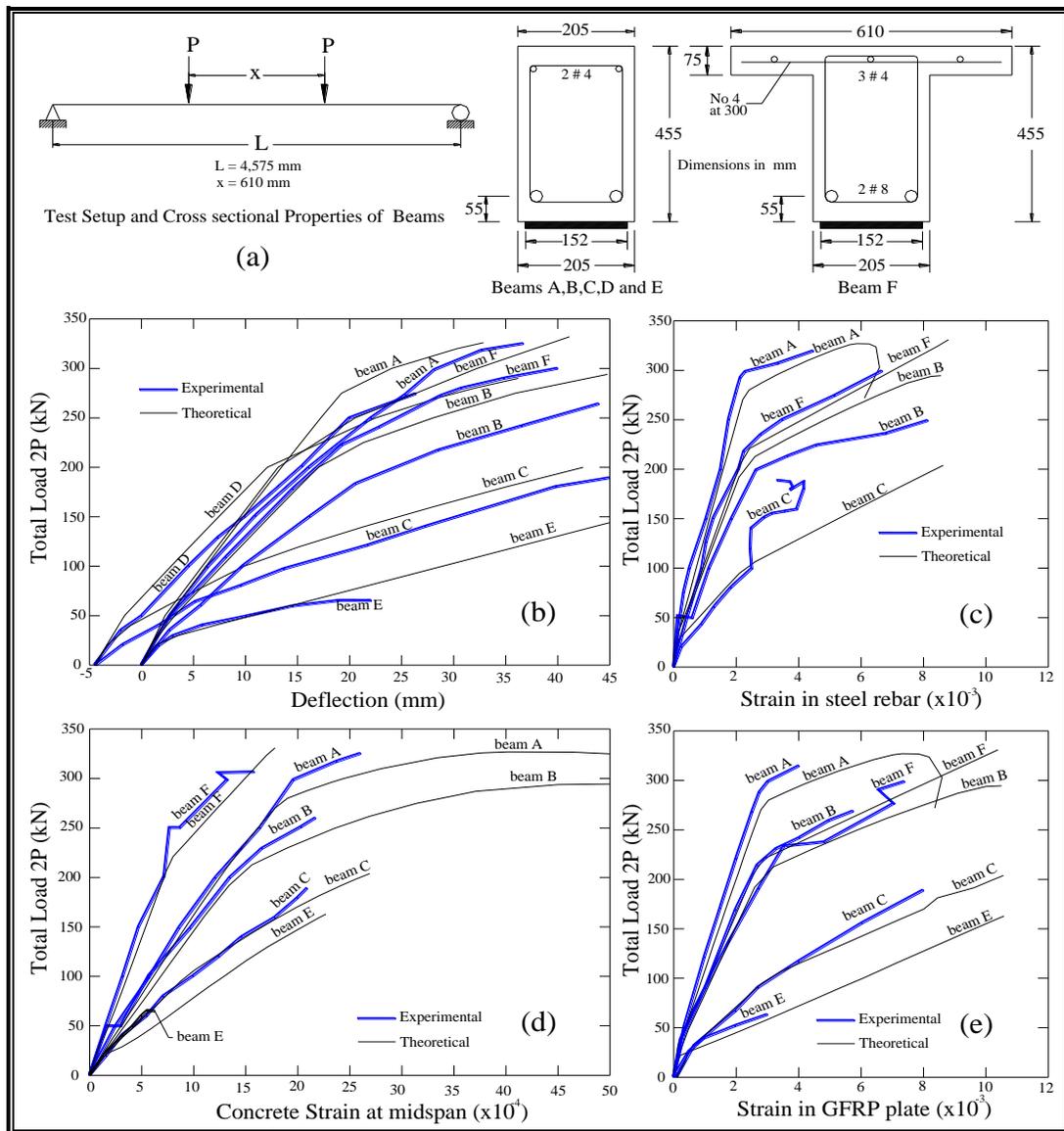


Figura 3 Esquema de sección de Viga y graficas de Carga-Deformación (fuente: (Saadatmanesh H. a., 1991))

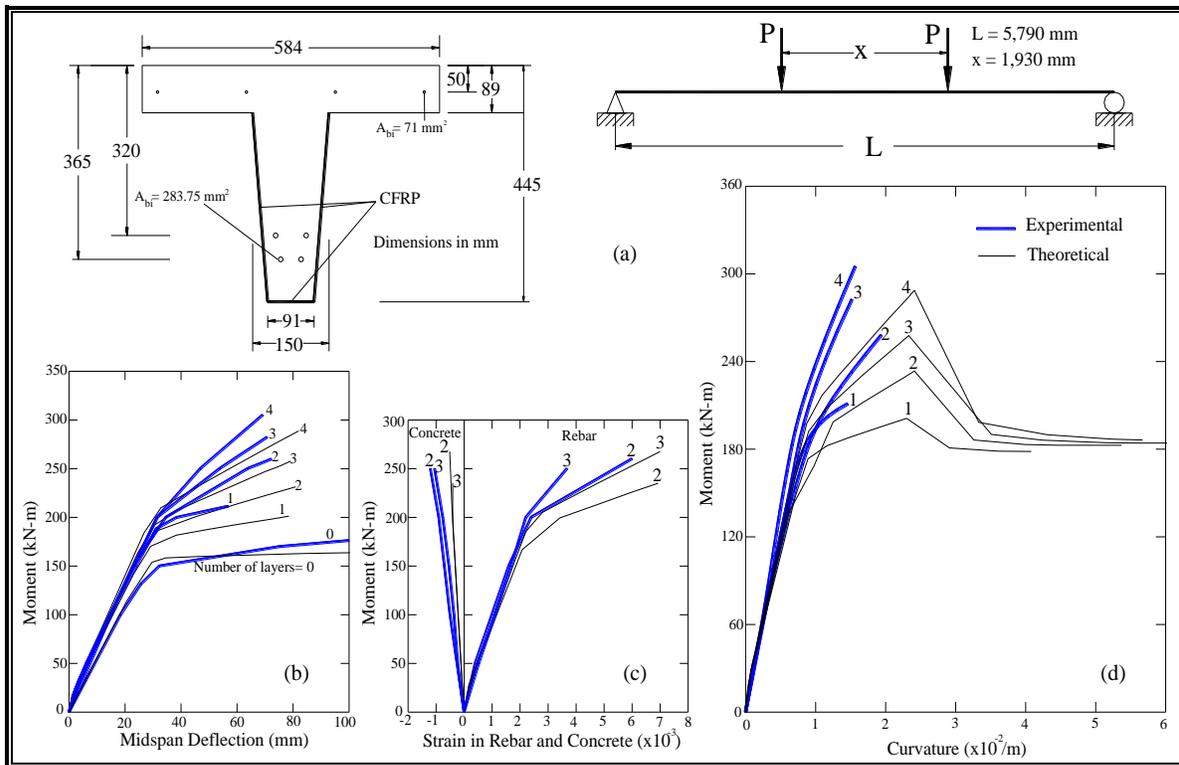


Figura 4 Esquema de sección de Viga y graficas de Momento-Curvatura (fuente: (Shahawy, 1999))

5.3 Laminados y Hebras de PRFV Pretensados para la Adaptación de Vigas

Prestressed FRP Laminates and Strands for Beam Retrofitting / Laminados y hebras de

PRFV pretensados para la adecuación de vigas. Debido a las necesidades actuales de acondicionamiento de edificios y puentes de hormigón pretensado existentes, se ha prestado cierta atención al uso de los laminados y hebras de PRFV pretensados. *Sen et al* [16] demostraron que el comportamiento real y la respuesta de las vigas pretensadas con hebras y laminados de FRP son similares a las de los pretensados con hebras de acero. *Lees y Burgoyne* [17] estudiaron los efectos de la unión en vigas pretensadas con cadenas de AFRP. *Grace et al* [18] investigaron el comportamiento de las vigas de caja reforzadas con barras y cordones CFRP pretensados unidos y sin uniones. Diferentes técnicas para el pretensado de laminados de FRP han sido propuestas por *Triantafillou et al* [19], *Wight et al* [20], y *Yu et al* [21].

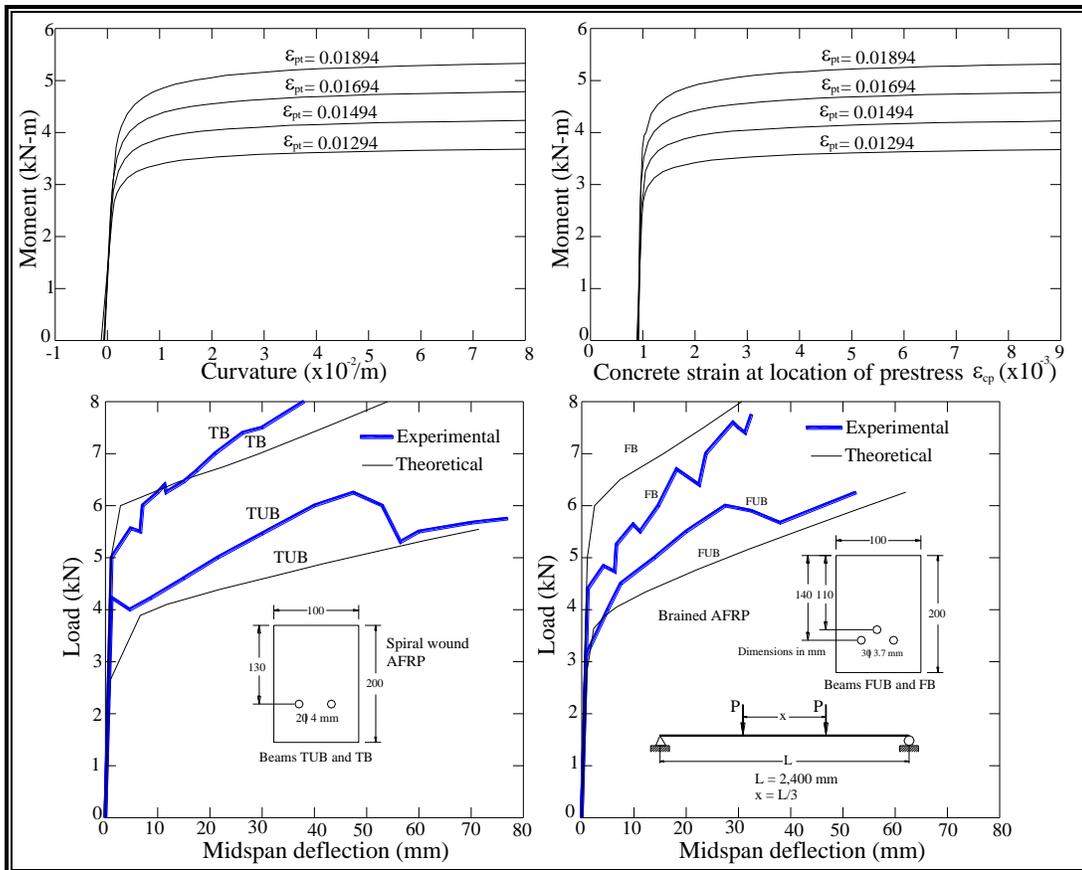


Figura 5 Graficas Momento Curvatura en Prueba de Viga por Lees y Burgoyne (fuente: (Lees, 1999))

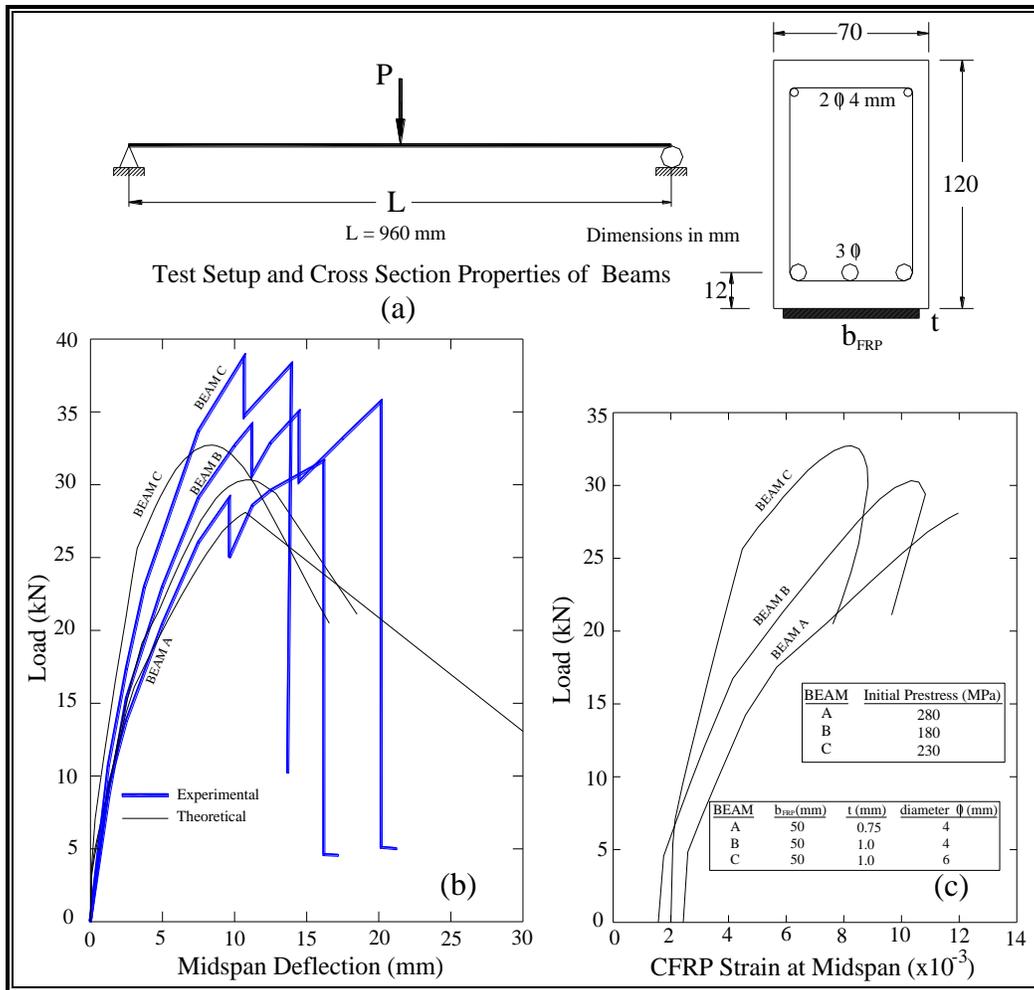


Figura 6 Esquema de sección de Viga y graficas de Carga-Deformación (fuente: (Triantafyllou, 1992))

5.4 FRP / Vigas Híbridas de Concreto

FRP/Concrete Hybrid Beams - Vigas Híbridas de Concreto y FRP -. *Deskovic et al* [22]

estudiaron el comportamiento de diferentes formas de vigas de caja GFRP con una plataforma de hormigón a lo largo de la superficie superior y reforzado con laminados CFRP a lo largo de la parte inferior de las vigas. *Fam y Rizkalla* [23] estudiaron el comportamiento de tubos de FRP sólidos y huecos rellenos de hormigón. *Schnerch et al* [24] desarrollaron un método para el análisis de columnas de haz híbridas rectangulares.

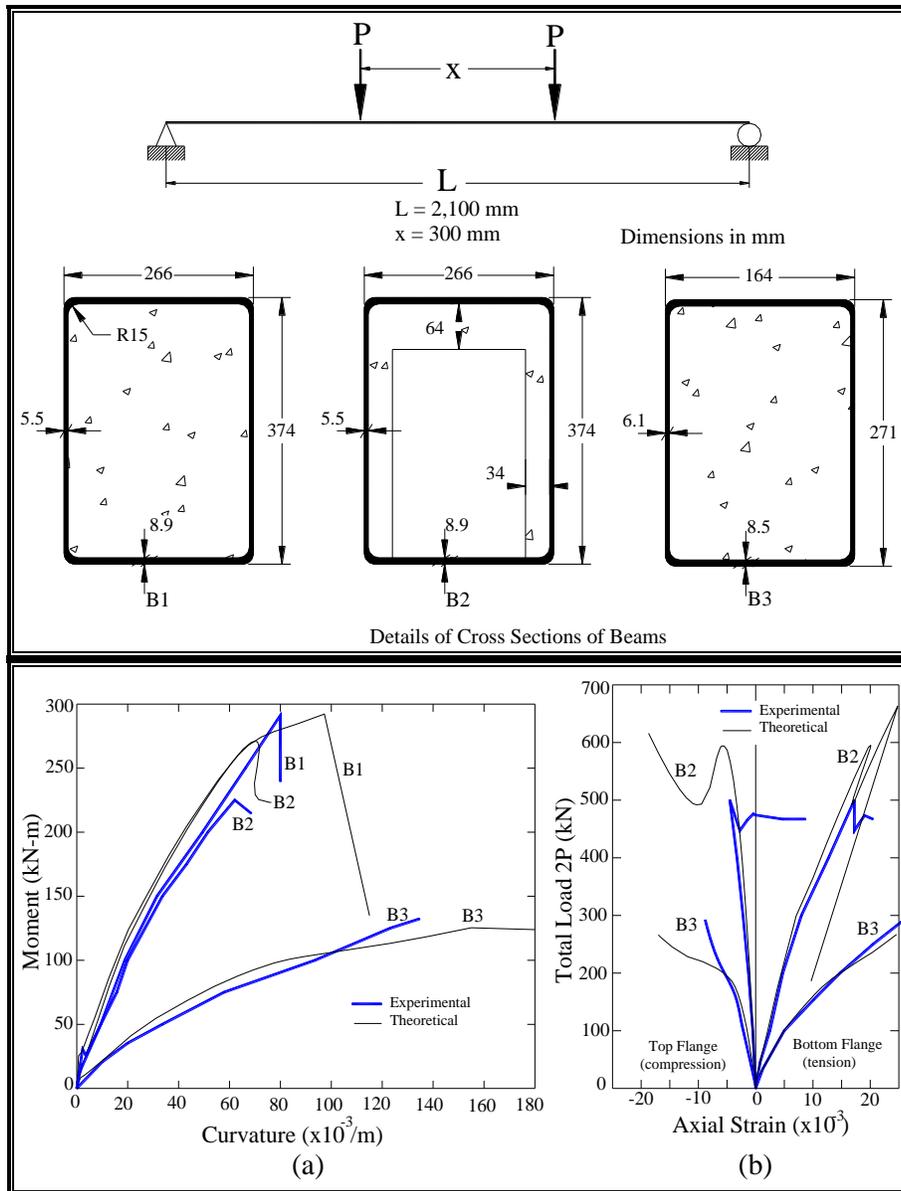


Figura 7 Esquema de sección y graficas de Momento-Curvatura de Viga probada por Schnerch et al (fuente: (Schnerch, 2002)

5.5 Columnas Reforzadas con FRP

Columns Reinforced with FRP- / Columnas reforzadas con FRP-. *Kawaguchi* [25] y *Mirmiran* et al [26] estudiaron experimentalmente el comportamiento de las columnas pretensadas con barras y hebras de FRP. *Issa* et al [27] estudiaron el comportamiento de las

5.7 Requisitos Normativos

Desde el punto de vista local, el uso de materiales compuestos tipo FRP no está regulado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (normativa sismorresistente vigente). Sin embargo, en el acta 105 de la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, de fecha 19 de junio de 2012, se indica que *“la Comisión no considera apropiado el uso de fibras de carbono y similares para la rehabilitación sísmica de estructuras”*.

Por otra parte, desde el punto de vista internacional, existen estándares y recomendaciones donde se dan recomendaciones para el uso de FRP. Unos de ellos son el ACI-440.2R-08 y ACI-440.2R-17 (Guía para el diseño y construcción de sistemas de polímeros reforzados con fibras (FRP) adheridas para el refuerzo externo de estructuras de concreto reforzado (CR)). Las recomendaciones generales de diseño que se presentan en la guía antes mencionada, y que son las expuestas en este documento, son basadas en los principios de diseño de concreto reforzado (CR) tradicional establecidos en los requisitos de ACI 318 y en el conocimiento del comportamiento mecánico específico del refuerzo de FRP.

En general, en el ACI-440.2R-17 se especifica que los sistemas de reforzamiento de FRP deben estar diseñados para resistir fuerzas de tracción mientras se mantiene la compatibilidad de la tensión entre el FRP y la superficie del concreto reforzado, pero no está en capacidad de resistir fuerzas de compresión. Sin embargo, es aceptable que el esfuerzo a tensión del sistema FRP experimente compresión debida a momentos o cambios en la carga del modelo, el cual, podría ser obviado.

5.7.1 Consideraciones de diseño general

Estas recomendaciones de diseño se basan en el diseño de estados límite principales. Este enfoque establece niveles aceptables de seguridad para la ocurrencia del estado límite de servicio (deflexiones excesivas y grietas) y estado límite último (flexión, esfuerzo de cortante, y deformación). En la verificación del esfuerzo nominal de un miembro, los posibles modos de falla y subsecuentes tensiones en cada material deben ser evaluados.

Es de aclarar que los requisitos expuestos a continuación no aplican a sistemas FRP usados para mejorar la resistencia a la flexión y/o cortante en las zonas que se espera la articulación plástica de momentos dúctiles en los elementos de pórticos de concreto reforzado que resisten cargas sísmicas.

5.7.1.1 Límites de reforzamiento.

Para determinar límites razonables de reforzamiento se debe considerar cuidadosamente que éstos estén definidos para prevenir el colapso de la estructura en caso de que se produzca una falla de adherencia u otra falla del sistema FRP debido a daños, vandalismo, u otras causas. El miembro estructural no reforzado, sin refuerzo de FRP, debe tener suficiente fuerza para resistir un cierto nivel de carga. En el caso de que el sistema FRP se dañe o no funcione adecuadamente, la estructura todavía deberá ser capaz de resistir un nivel razonable de carga sin colapso.

La resistencia nominal existente de la estructura debe ser suficiente para resistir un nivel de carga como lo describe la siguiente ecuación:

$$\phi R_{n(Existente)} \geq (1.1S_{DL} + 0.75S_{LL})_{(Nuevo)} \quad (9-2) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

S_{DL} = Efectos de carga muerta

S_{LL} = Efectos de carga viva

R_n = Resistencia nominal del elemento

5.7.1.2 Selección del Sistema FRP.

Consideraciones ambientales —

Las condiciones Ambientales afectan de manera única a las resinas y fibras de diversos sistemas FRP. Las propiedades mecánicas (por ejemplo, la fuerza de tracción, tensión de tracción máxima y módulo de elasticidad) de algunos sistemas de FRP se degradan bajo la exposición a ciertos ambientes tales como alcalinidad, agua salada, productos químicos, luz ultravioleta, altas temperaturas, alta humedad, y ciclos de congelación y descongelación. A continuación, se presentan los factores de reducción de resistencia y deformaciones según las condiciones ambientales a las que esté expuesto el sistema FRP.

Tabla 5 Factores de reducción ambiental para Varios sistemas de FRP y condiciones de exposición (fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

Condiciones de exposición	Tipo de fibra	Factor de reducción ambiental C_E
Exposición interior	Carbono	0.95
	Vidrio	0.75
	Aramida	0.85
Exposición exterior (puentes, muelles, y estacionamientos no cerrados)	Carbono	0.85
	Vidrio	0.65
	Aramida	0.75
Ambiente agresivo (químico plantas y plantas de tratamiento de aguas residuales)	Carbono	0.85
	Vidrio	0.50
	Aramida	0.70

5.7.1.3 Propiedades del material de diseño

La resistencia de diseño último a la tracción se debe determinar utilizando el factor de reducción ambiental (mostrado anteriormente) para el tipo de fibra apropiada y condiciones de exposición, tal como se indica a continuación.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (9-4a) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

f_{fu} = Resistencia de diseño máxima a la tracción de FRP (MPa)

f_{fu}^* = Resistencia máxima a la tracción del material FRP como reportado por el fabricante, (MPa)

Del mismo modo, la deformación unitaria de rotura debe reducirse para condiciones de exposición ambiental.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (9-4b) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

ε_{fu} = Deformación unitaria de rotura por tensión de refuerzo de FRP, en (mm / mm)

ε_{fu}^* = Tensión de ruptura última del refuerzo de FRP, en (mm / mm)

Debido a que los materiales de FRP son lineales elásticos hasta la falla, el módulo de diseño de elasticidad para FRP unidireccional puede ser determinado a partir de la ley de Hooke. La expresión para el módulo de elasticidad, dado en la Eq. (9-4c), reconoce que el módulo de elasticidad normalmente no se ve afectado por las condiciones ambientales. El módulo dado en esta ecuación será el mismo que el valor inicial reportado por el fabricante.

$$E_{fu} = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (9-4c) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

E_f = Módulo de elasticidad a la tracción de FRP, (MPa)

5.7.2 Reforzamiento de Flexión

Aplicar el sistema de refuerzo de FRP a la cara de tensión de un elemento de concreto reforzado a flexión con fibras orientadas a lo largo de la longitud del miembro proporcionará un aumento en la fuerza a flexión. Incrementos en la resistencia general del 10 al 160% ha sido documentado cuando se toman en cuenta los límites de reforzamiento, la ductilidad y los límites

de capacidad de servicio. Sin embargo, el ACI-440.2-R17 recomienda un aumento de la fuerza no mayor del 40%.

5.7.2.1 *Momento Nominal*

El diseño de resistencia a la flexión ϕM_n se refiere a la fuerza nominal del miembro multiplicada por un factor de reducción de la fuerza, y el momento aumentado M_u se refiere al momento calculado a partir de cargas mayoradas.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (10-1) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

5.7.2.1.1 Modos de falla:

la resistencia a la flexión de una sección depende del modo de fallo de control. Los siguientes son los modos de falla a flexión deben ser investigados para un FRP reforzado sección (GangaRao y Vijay 1998):

- Aplastamiento del concreto en compresión antes ceder el acero de refuerzo (se asume que ocurre cuando la deformación unitaria en compresión del concreto alcanza su máximo valor utilizable $\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0.003$);
- Rotura del laminado de FRP por fluencia del acero a tensión (se asume que ocurre cuando la deformación unitaria in el FRP alcanza su deformación unitaria de ruptura ($\epsilon_f = \epsilon_{fu}$) antes que el concreto alcance su máximo valor utilizable);
- Aplastamiento del concreto por fluencia del acero a tensión;
- Desprendimiento del recubrimiento del concreto por cortante / tensión (Superficie de Concreto Reforzado); y

- Desacoplamiento del FRP de la superficie del concreto (desprendimiento del FRP). Para prevenir esto, en las secciones donde el refuerzo adherido FRP termina, la deformación unitaria en el refuerzo FRP debería limitarse a la deformación unitaria donde se pierda la adherencia, y se puede estimar como se indica a continuación.

$$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'c}{nE_f t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \quad (SI) \quad (10-1.1) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

ϵ_{fd} = Deformación unitaria donde se pierde la adherencia del refuerzo FRP externamente adherido (mm / mm)

n = Número de capas de refuerzo de FRP

t_f = Espesor nominal de una capa de refuerzo de FRP, (mm)

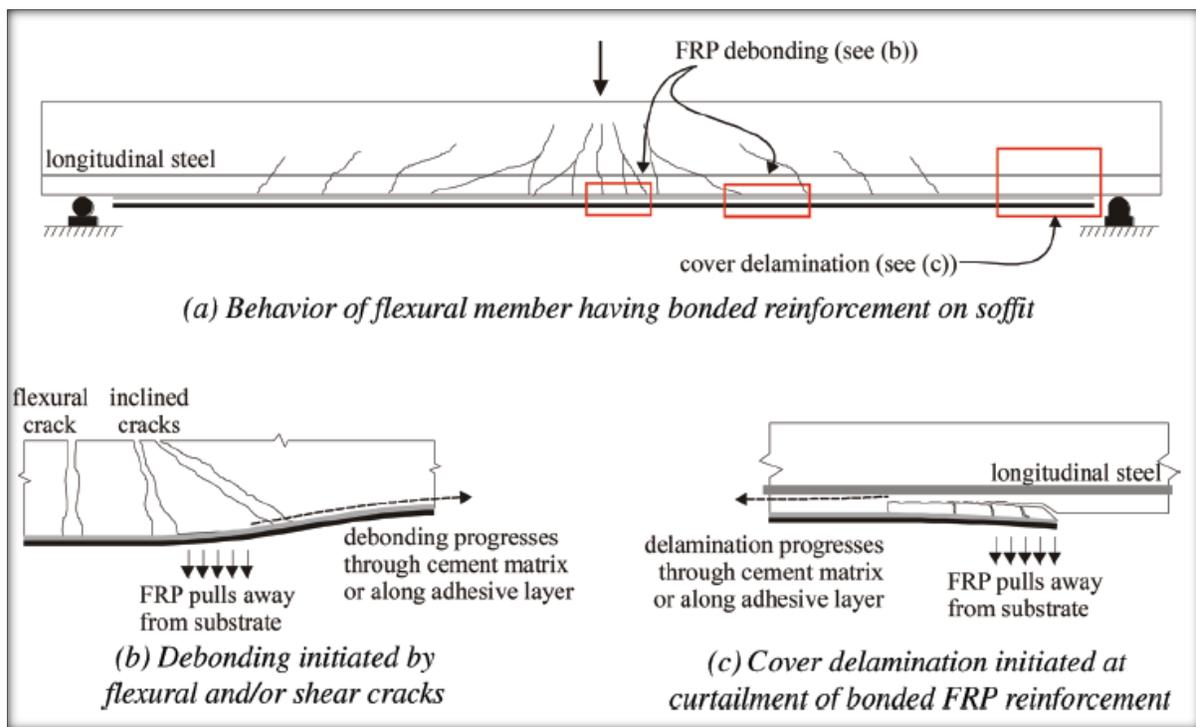


Figura 9 Desacoplamiento y delaminación de sistemas FRP adheridos externamente
(fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

5.7.2.1.2 Nivel de deformación en el refuerzo de PRF

El nivel de la deformación máxima que se puede lograr en el refuerzo de FRP será gobernado por el nivel de tensión desarrollado en el FRP en el punto en el que el concreto se aplasta, el

punto de ruptura de FRP, o el punto en el que FRP se separa de la superficie. El nivel de deformación efectivo en el refuerzo de FRP en el límite máximo se puede encontrar en la siguiente ecuación. (10-3)

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} - \epsilon_{bi} \right) \leq \epsilon_{fd} \quad (10-2.5) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

ϵ_{fe} = nivel de deformación efectivo en refuerzo de FRP alcanzado en la ruptura, (mm / mm)

5.7.2.1.3 Nivel de esfuerzo en el refuerzo de FRP.

El nivel de esfuerzo efectivo en el refuerzo de FRP es el nivel máximo que se puede desarrollar en el refuerzo de FRP antes de la falla por flexión de la sección. El nivel efectivo de este esfuerzo se puede encontrar a partir del nivel de tensión en el FRP, asumiendo que el comportamiento es perfectamente elástico, y está dado por la ecuación:

$$f_{fe} = E_F \epsilon_{fe} \quad (10-2.6) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

f_{fe} = Esfuerzo efectivo en el FRP; nivel de esfuerzo alcanzado en la sección de falla, (MPa)

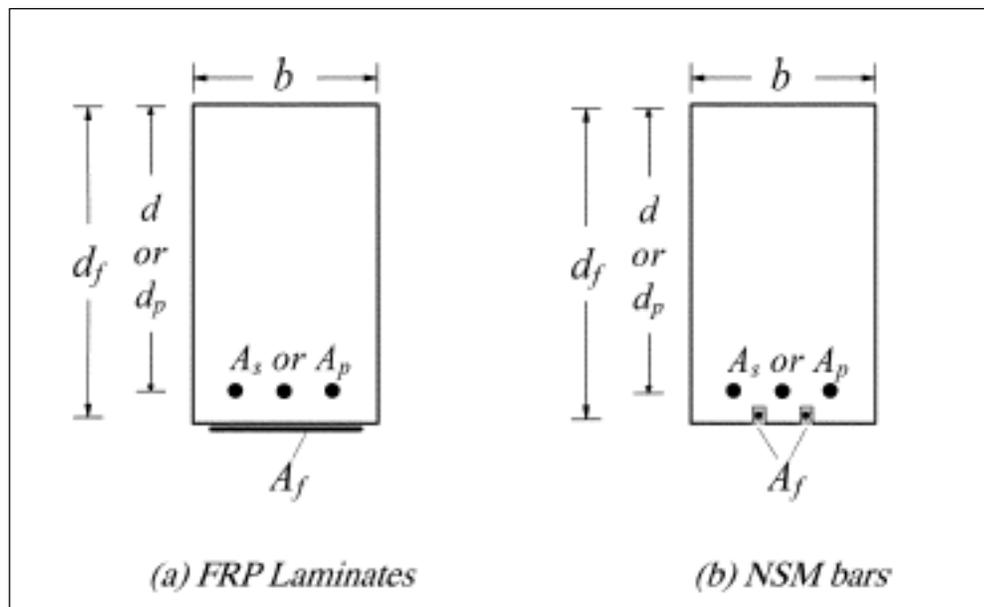


Figura 10 Profundidad efectiva de los sistemas de FRP (fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

5.7.2.1.4 Factor de reducción de fuerza

El uso de refuerzo FRP externamente adherido para el reforzamiento de la flexión puede reducir la ductilidad del elemento original. En algunos casos, la pérdida de ductilidad es despreciable. Sin embargo, se debe verificar las secciones que experimentan una significativa pérdida de ductilidad.

Los factores de reducción de resistencia, que son los contenidos en el ACI 318, son los que se muestran a continuación

$$\phi = \begin{cases} 0.90 \text{ para } \varepsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{(0.005 - \varepsilon_{sy})} \text{ para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 \text{ para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (10-2.7) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

ε_{sy} = tensión correspondiente al límite elástico de refuerzo de acero no pretensado, en./in. (mm / mm)

ε_t = tensión de tracción neta en acero de tensión extrema en Resistencia nominal, en./in. (mm / mm)

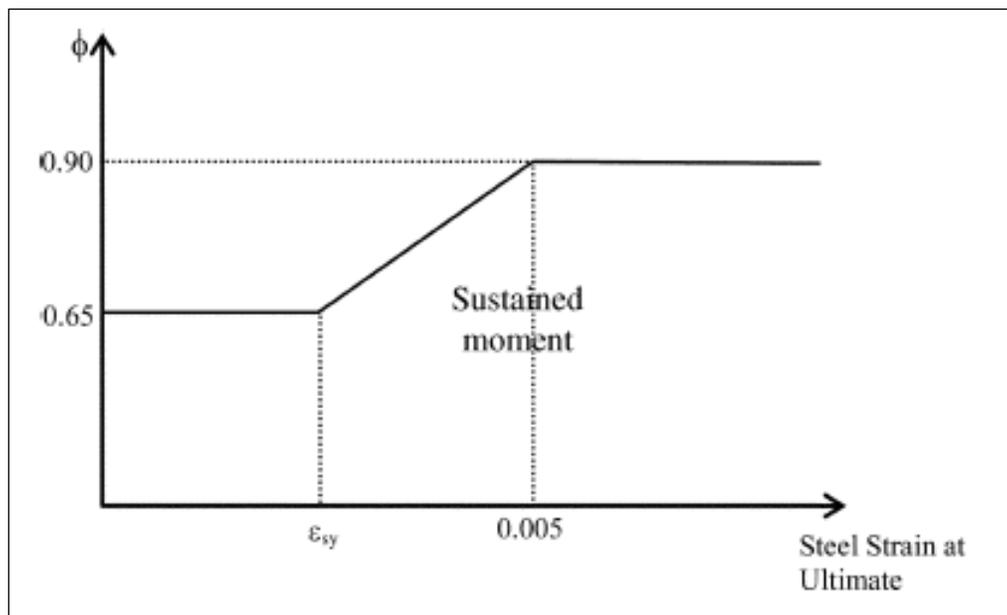


Figura 11 Representación gráfica de la reducción de la fuerza (fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

5.7.2.1.1 Condiciones de servicio

Para mantener condiciones de servicio adecuadas, las tensiones en el refuerzo y en el concreto deben limitarse según se indica a continuación:

$$f_{s,s} \leq 0.80f_y \quad (10-2.8a) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

$$f_{c,s} \leq 0.45f'_c \quad (10-2.8b) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

$f_{c,s}$ = esfuerzo de compresión en concreto en condición de servicio (MPa)

$f_{s,s}$ = nivel de tensión en refuerzos de acero no comprimidos en cargas de servicio (MPa)

5.7.2.1.2 Límites de esfuerzo por retracción y fatiga.

Para evitar la ruptura por retracción del refuerzo de FRP bajo tensiones o fallas sostenidas debidas a tensiones cíclicas y fatiga del refuerzo FRP, los niveles de tensiones en el refuerzo debe ser revisado. Dado que estos niveles estarán dentro del rango de respuesta elástica de el elemento, las tensiones se pueden calcular mediante análisis elástico.

$$f_{f,s} \leq \text{Limite de esfuerzo máximo} \quad (10-2.9) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

Tabla 6
Esfuerzo por carga sostenida de servicio en refuerzo de FRP

Tipo de Esfuerzo	Tipo de fibra		
	GFRP	AFRP	CFRP
Límite de esfuerzo máximo	$f_{f,s} \leq 20f_{fu}$	$f_{f,s} \leq 0.30f_{fu}$	$f_{f,s} \leq 0.55f_{fu}$

Datos obtenidos de Bibliografía (fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

$f_{f,s}$ = nivel de esfuerzo en FRP causado por un momento dentro rango elástico de miembro, (MPa)

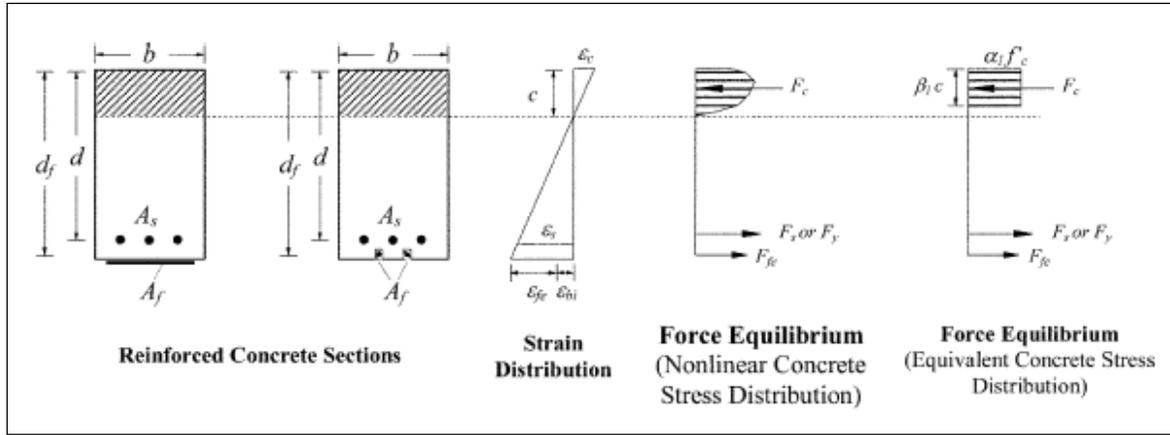


Figura 12 Tensión interna y distribución de tensión para una sección rectangular bajo flexión en estado limite último (fuente: (ACI-440.2-R08, 2008))

5.7.2.1.3 Fuerza última de sección rectangular reforzado individualmente

El nivel de esfuerzo efectivo en el refuerzo de FRP puede ser encontrado a partir del nivel de tensión en el FRP, asumiendo perfectamente comportamiento elástico. Basado en el nivel de tensión en el refuerzo de FRP, el nivel de deformación en el refuerzo de acero no comprimido puede ser encontrado a partir de la ec. (10-2.0a) usando compatibilidad de deformación:

$$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left[\frac{d-c}{d_f-c} \right] \quad (10-2.10a) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

ϵ_s = nivel de deformación en refuerzo del acero (mm / mm)

ϵ_{bi} = nivel de deformación del recubrimiento en el momento de instalación de FRP (la tensión es positiva), (mm / mm)

c = distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, (mm)

d = distancia de la fibra de compresión extrema a centroide del refuerzo de tensión (mm)

d_f = profundidad efectiva del refuerzo de flexión FRP (mm)

La tensión en el acero se determina a partir del nivel de deformación en el acero utilizando su curva de tensión-deformación.

$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \quad (10-2.10b) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

f_s = Esfuerzo en el refuerzo de acero no comprimido (MPa)

Con la tensión y el nivel de esfuerzo en el FRP y el refuerzo de acero determinado para la profundidad del eje neutro supuesto, el equilibrio de la fuerza interna se puede verificar utilizando la ec. (10-2.10c)

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad (10-2.10c) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

La resistencia nominal a la flexión de la sección con refuerzo externo de FRP se calcula a partir de la ec. (10-13). Un factor de reducción adicional para FRP, ψ_f , se aplica al aporte de resistencia a la flexión del refuerzo FRP. El valor recomendado de ψ_f es 0.85. Este factor de reducción para la contribución de la fuerza de refuerzo de FRP se basa en el análisis de confiabilidad estadística calibrado experimentalmente.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (10-2.10d) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

A_f = área de refuerzo externo de FRP (mm²)

A_s = área de refuerzo de acero no pretensado (mm²)

5.7.3 Reforzamiento de cortante

Se ha demostrado que los sistemas FRP aumentan la resistencia a cizalladura de vigas y columnas de concreto reforzado existentes mediante envoltura o envolviendo parcialmente a los miembros (Malvar et al. 1995; Chajes et al. 1995; Norris et al. 1997; Kachlakev y

McCurry 2000). Orientación de las fibras FRP transversales al eje del miembro o perpendicular a las posibles grietas de corte es eficaz para proporcionar resistencia al corte adicional (Sato et al. 1996). El aumento de la resistencia al corte también puede resultar en fallas a flexión que son relativamente más dúctiles en comparación con la naturaleza de las fallas de corte.

5.7.3.1 Consideraciones generales

El refuerzo de cortante debe ser proporcionado utilizando FRP externo localizado donde se espera la articulación plástica o la afectación de tensión y para mejoramiento post-fluencia al comportamiento de la flexión de los miembros en pórticos que resisten momentos por cargas sísmicas solo envolviendo por completo la sección.

Para refuerzo externo de FRP en forma de tiras discretas, el espacio de centro a centro entre las tiras no debe exceder la suma de $d / 4$ más el ancho de la tira.

5.7.3.2 Esquemas de aplicación FRP

Los tres tipos de esquemas de envoltura de FRP utilizados para aumentar la resistencia al corte de las vigas prismáticas, rectangulares, o las columnas se ilustran en la figura 11.1. Envoltiendo completamente el sistema FRP alrededor de la sección en los cuatro lados es el esquema de envoltura más eficiente y se utiliza más comúnmente en aplicaciones de columna donde el acceso a los cuatro lados está generalmente disponible. En aplicaciones a vigas integrada con una losa hace que no sea práctico envolverla completamente, la resistencia al corte se puede mejorar envolviendo el sistema de FRP alrededor de tres lados de la viga (U-wrap) o pegando a dos lados opuestos de la misma que es el esquema menos eficiente

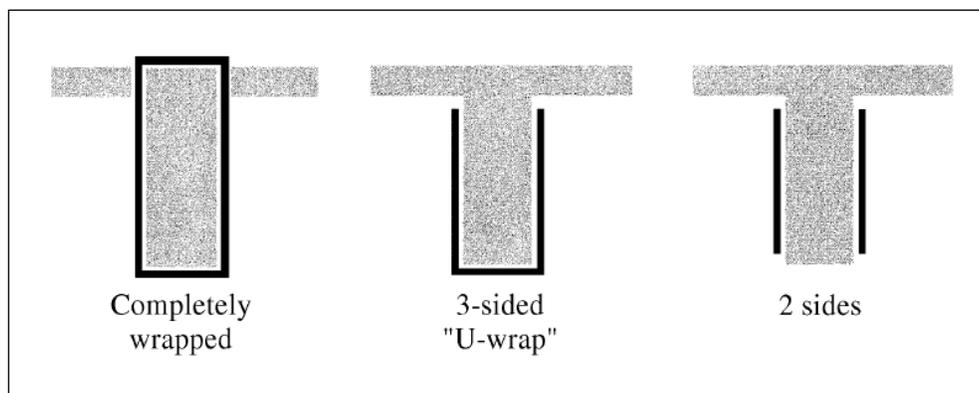


Figura 13 Esquemas típicos de laminados para el fortalecimiento de cizalladura.

Tabla 7
Factor de reducción adicional recomendado para refuerzo de cortante con FRP

$\psi_f = 0.95$	<i>Miembros completamente envueltos</i>
$\psi_f = 0.85$	<i>Esquemas de tres lados y dos lados opuestos</i>

Datos obtenidos de Bibliografía (fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

5.7.3.3 Fuerza de cortante nominal

La resistencia de diseño al corte de un elemento de concreto reforzado con un sistema de FRP debe exceder la fuerza cizalladura requerida. (ec. (11-3a)).

La resistencia al cortante requerida de un miembro de concreto reforzado con FRP debe ser multiplicado por los factores de carga requeridos por ACI 318. La fuerza de cizalla de diseño debe calcularse multiplicando la resistencia nominal al corte por el factor de reducción de resistencia ϕ , como se especifica por la ACI 318

$$\phi V_n \geq V_u \quad (11-3a) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

La resistencia nominal al cortante de un miembro concreto reforzado con FRP puede ser determinada mediante la adición de la contribución del refuerzo de cortante externo FRP a las aportaciones del acero de refuerzo (estribos, lazos o espirales) y el concreto (ec. (11-3b)). Un factor de reducción adicional ψ_f es aplicado a la contribución del sistema FRP.

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (11-3b) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

5.7.3.4 Contribución a la resistencia al cortante de FRP

En la ilustración 18 muestra las variables dimensionales utilizadas en los cálculos de refuerzo de cortante para laminados de FRP. La contribución del sistema FRP a la resistencia al corte de un miembro se basa en la orientación de la fibra y un supuesto patrón de fisuras (Khalifa et al.

1998). La resistencia al corte proporcionado por el refuerzo de FRP puede ser determinado calculando la fuerza resultante por de la tensión de tracción en el FRP a través de la grieta asumida. El aporte del refuerzo de cortante por cortante de FRP es dado por Eq. (11-4a)

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\text{Sen}\alpha + \text{Cos}\alpha) d_{fv}}{s_f} \quad (11-4a) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

Donde:

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (11-4b) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

A_{fv} = área de refuerzo de cortante de FRP con espaciamiento s , (mm²)

La tensión de tracción que se puede desarrollar en el refuerzo de cortante FRP en la fuerza nominal es directamente proporcional al nivel de tensión.

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f \quad (11-4d) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

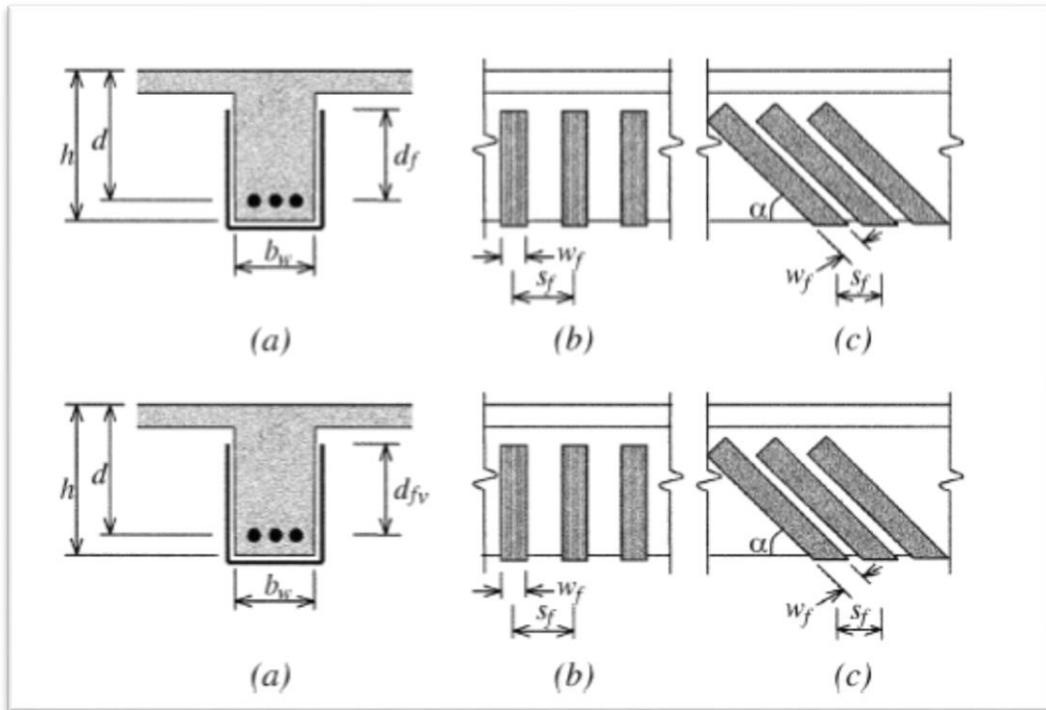


Figura 14 Ilustración de las variables dimensionales utilizadas en cálculos de refuerzo de cortante para reparación, reacondicionamiento o refuerzo mediante laminados de FRP(fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

El coeficiente de reducción de adherencia es una función de la fuerza del concreto, el tipo de esquema de envoltura utilizado y la rigidez del laminado. El coeficiente de reducción de enlace puede ser calculado de la ec. (11-4.1.2b) a (11-4.1.2e) (Khalifa et al. 1998)

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \epsilon_{fu}} \leq 0.75 \text{ (in-lb)} \quad (11-4.1.2b) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \epsilon_{fu}} \leq 0.75 \text{ (SI)} \quad (11-4.1.2b) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

La longitud de unión activa L_e es la longitud sobre la cual la mayor parte de la tensión de enlace se mantiene. Esta longitud es dada por la ec. (11-4.1.2c)

$$L_e = \frac{2500}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \text{ in-lb} \quad (11-4.1.2c) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

$$L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \text{ SI} \quad (11-4.1.2c) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

Donde:

$$k_1 = \left[\frac{f'_c}{4000} \right]^{2/3} \text{ (in-lb)} \quad (11-4.1.2d) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

$$k_1 = \left[\frac{f'_c}{27} \right]^{2/3} \text{ SI} \quad (11-4.1.2d) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{Para laminado en U} \\ \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} & \text{Para laminado en dos lados} \end{cases} \quad (11-4.1.2e) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

Límites de refuerzo: la resistencia total al cortante proporcionado por el refuerzo debe ser tomado como la suma de la contribución del refuerzo de cizalladura de FRP y el refuerzo de cizalladura del acero. La suma de las fuerzas de corte proporcionado por el refuerzo de cizalla debe ser limitada y basado sobre los criterios dados para el acero solo en ACI 318. Este límite se establece en la ec. (11-11)

$$V_s + V_f \leq 8 \sqrt{f'_c} b_w d \text{ in-lb}$$

$$V_s + V_f \leq 0.66\sqrt{f'_c}b_wd SI \quad (11-4.3) \text{ (ACI-440.2-R17, 2017)}$$

5.7.4 Reforzamiento de los miembros sujetos a fuerza axial

El confinamiento de columnas de concreto reforzado mediante chaquetas o envolturas de FRP se pueden utilizar para mejorar su resistencia y ductilidad. Un aumento de la capacidad es un resultado inmediato expresado normalmente en términos de resistencia de carga máxima mejorada. La mejora de la ductilidad, por otro lado, requiere más cálculos complejos para determinar la capacidad de un miembro para mantener la rotación y la deriva sin una pérdida sustancial de la resistencia.

5.7.4.1 Compresión axial pura

Los sistemas de FRP se pueden utilizar para aumentar la fuerza de compresión axial a un elemento de concreto al proporcionarle confinamiento con una chaqueta de FRP (Nanni y Bradford 1995; Toutanji 1999). La limitación de un elemento de concreto se realiza orientando las fibras transversales al eje longitudinal del miembro. En esta orientación, las fibras transversales o de aro son similares a espiral convencional o corbata de refuerzo en acero. Cualquier contribución de fibras alineadas longitudinalmente a la fuerza de compresión axial a un miembro concreto podría ser descartada.

Para reforzamiento de miembros no pretensados con espiral de acero existente.

$$\phi P_n = 0.85 \phi [0.85 f_{cc}' (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (12-1a)$$

Para reforzamiento de miembros no pretensados con acero existente.

$$\phi P_n = 0.8 \phi [0.85 f_{cc}' (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (12-1b)$$

La máxima resistencia a la compresión del concreto confinado f_{cc}' y la presión máxima de confinamiento f_l se calcula utilizando la ec. (12-3) y (12-4), respectivamente (Lam y Teng

2003a, b) con la inclusión de un factor de reducción adicional $\psi_f = 0.95$.

$$f_{cc}' = f_c' = \psi_f 3.3 \kappa_a f_l \quad (12-3)$$

f_{cc}' = resistencia a la compresión de concreto confinado, (MPa)

$$f_l = 2E_f n t_f \varepsilon_{fe} / D \quad (12-4)$$

f_l = presión de confinamiento máxima debida a la camisa de FRP, psi (MPa)

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_c' (1.50 + 12 \kappa_b f_l / f_c' (\varepsilon_{fe} / \varepsilon_c')^{0.45}) \quad (12-6)$$

$$\varepsilon_{ccu} \leq 0.01 \quad (12-7)$$

ε_{ccu} = deformación unitaria de compresión axial última de Concreto confinado

correspondiente a $0.85f_{cc}'$ en un miembro confinado (miembro confinado para restaurar su resistencia de compresión de diseño de concreto), o la deformación unitaria de compresión axial última de concreto correspondiente a la falla del miembro altamente confinado (Fig. 12.1)

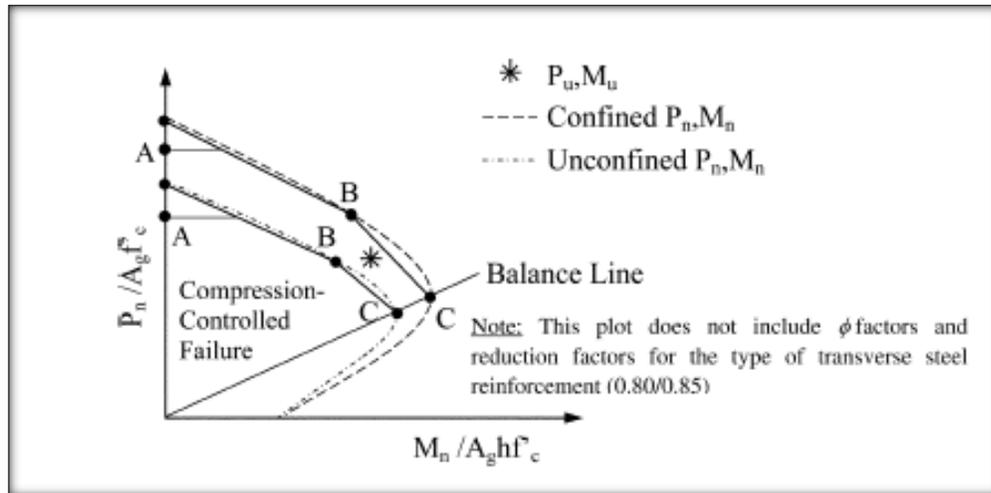


Figura 15 Diagrama de interacción para una columna (fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

5.7.4.2 Aumento de la ductilidad

El aumento de la ductilidad de una sección resulta de la capacidad de desarrollar mayores deformaciones en el hormigón antes de la falla por compresión (Seible et al. 1997). El sistema de reforzamiento FRP también sirve para retrasar el pandeo de refuerzo de acero longitudinal en compresión.

Para aplicaciones sísmicas, las chaquetas de FRP deben ser diseñadas para proporcionar un esfuerzo confinante suficiente para desarrollar tensiones de compresión asociadas a las demandas de desplazamiento del concreto. La máxima deformación por compresión en el concreto para un miembro confinado en FRP se puede encontrar mediante el uso de la ec. (12-6). Las fuerzas de corte también deben evaluarse para evitar la falla por cortante frágil de acuerdo con ACI 318.

6 Ejemplo de aplicación para un caso de estudio

6.1 Descripción del caso de estudio

Se analizarán ciertas secciones de un elemento de una edificación donde hubo un incremento de la carga viva por cambio de uso. Los análisis consideran una viga específica de una estructura existente de 12 pisos conformada por un sistema de pórticos resistentes a momentos que fue diseñada y construida bajo la vigencia de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98. La estructura fue concebida (y diseñada) inicialmente para un determinado nivel de carga viva (uso comercial, 2.0 kN/m^2), la cual aumentó significativamente por el cambio de uso a partir del piso tercero (pasó a ser oficinas a bodegas, 12.00 kN/m^2). La viga objeto de estudio tiene una sección transversal con dimensiones $500 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ y una resistencia especificada a la compresión del concreto de $f'_c = 21 \text{ MPa}$. Las secciones aludidas hacen referencia un extremo de la viga 6 (en el eje D) y a la parte central del tramo D-F de la viga mencionada en el piso siete, tal como se muestra debajo.

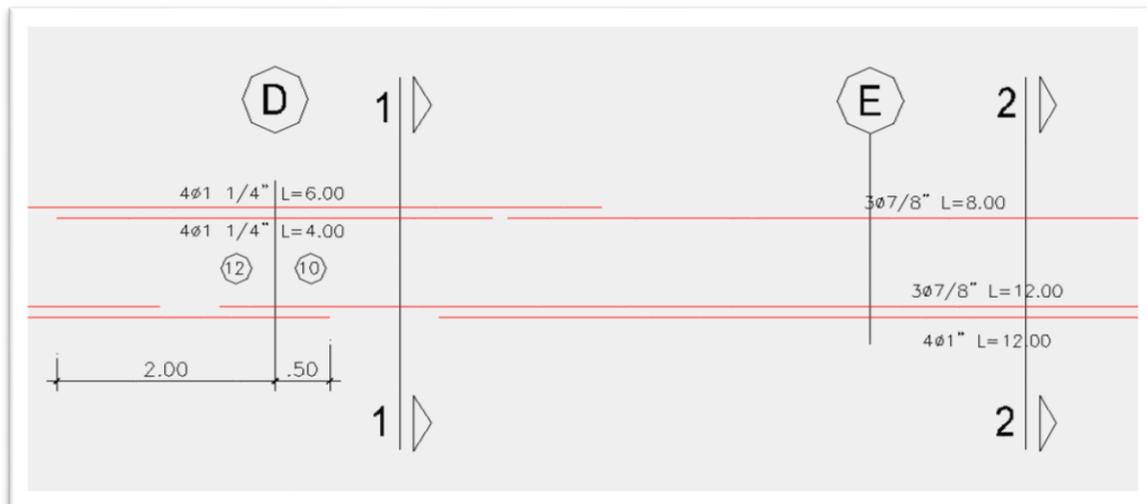


Figura 16 Despiece de la viga continua con refuerzo externo de FRP. Caso de Estudio.
(fuente: Elaboración Propia)

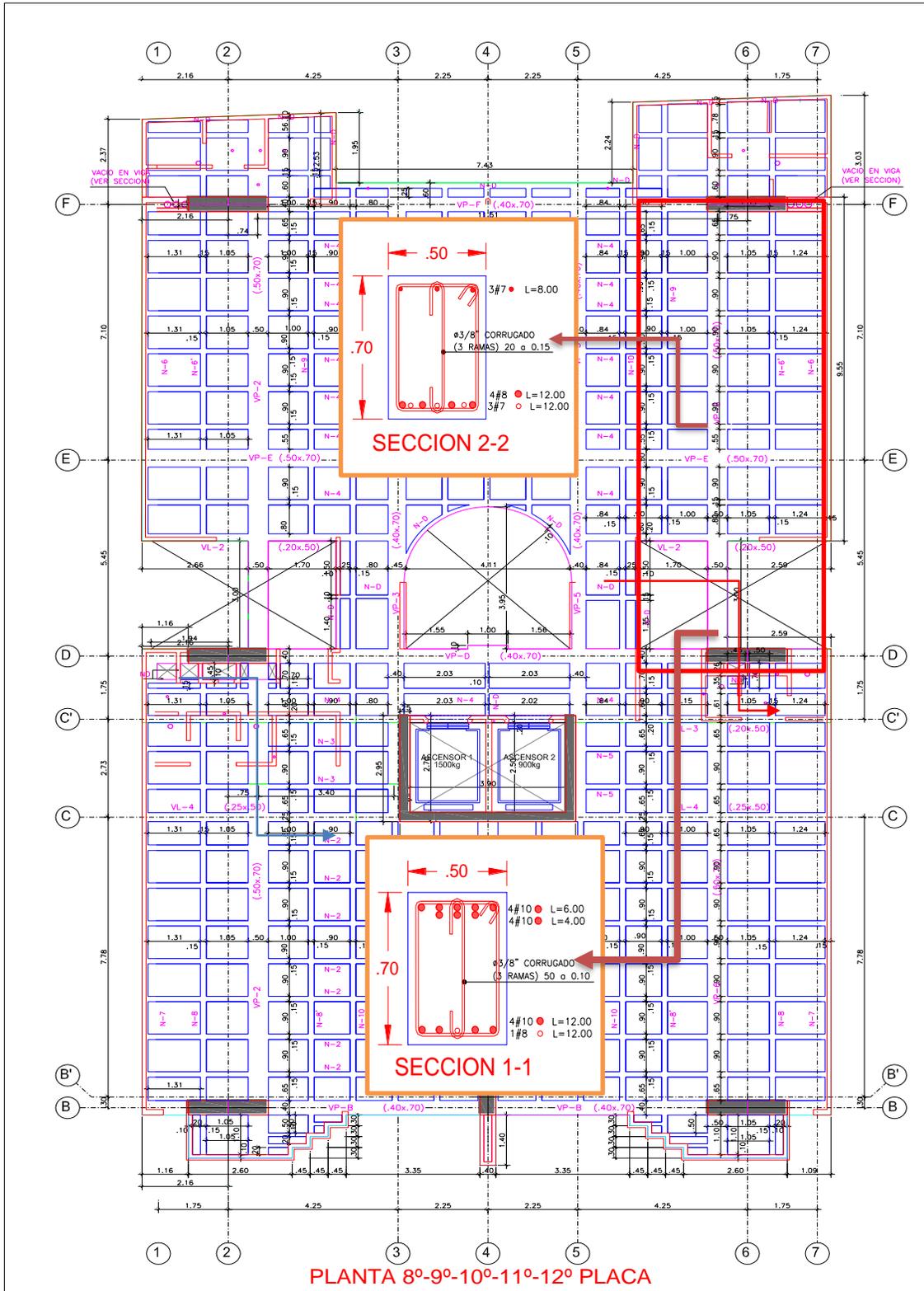


Figura 17 Planta Estructural Típica del 4º al 12º piso. Caso de Estudio (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 18 Imágenes del elemento del caso de estudio(1) (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 19 Imágenes del elemento del caso de estudio(2) (Fuente: Elaboración Propia)

6.2 Diseño de reforzamiento para flexión con laminados de FRP

Para analizar la posibilidad de implementar refuerzo tipo CFRP por flexión en la viga caso de estudio se analizarán las solicitaciones y la configuración de la viga en la sección 2-2, que es donde se da el máximo momento positivo. En la sección mencionada se tiene una sección doblemente reforzada que está compuesta por cuatro (4) barras No. 8 y tres (3) barras No 7 (Figura 20). Un análisis de la viga existente indica que la viga cumple con los requisitos de servicio de deformación y control de grietas. Sin embargo, su resistencia a la flexión es inadecuada para soportar el aumento de la carga viva.

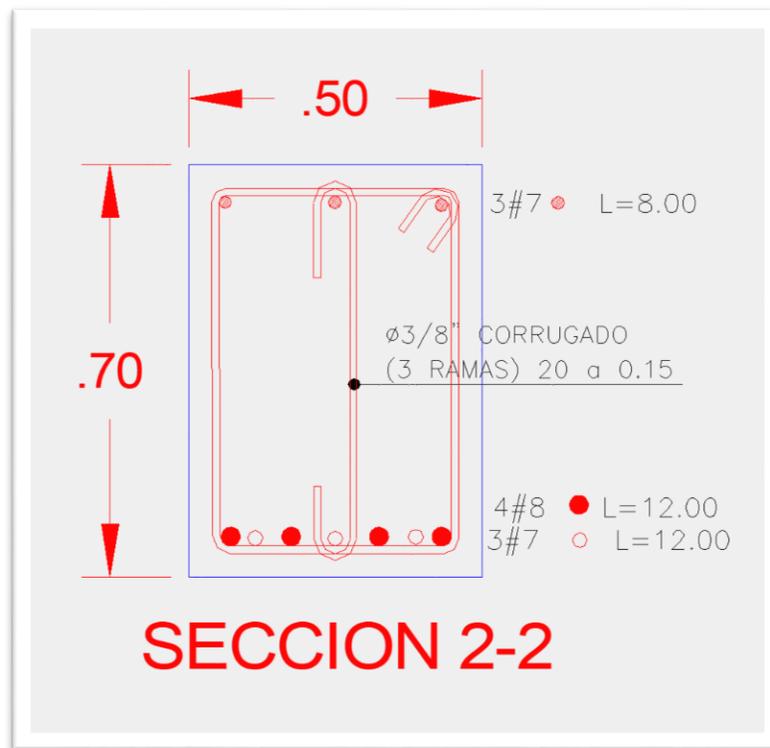


Figura 20 Sección 2-2 de Viga en zona de Máxima Flexión. (fuente: Elaboración Propia)

6.2.1 Cálculo de las propiedades a tracción del sistema FRP

Este ejemplo ilustra la derivación de las propiedades del material en función del área de la fibra neta en comparación con las propiedades basadas en la zona del laminado neto. Como se describe en la Sección 4.3.1, ambos métodos para determinar las propiedades del material son válidos. Es importante, sin embargo, que todos los cálculos de diseño utilicen de manera consistente las propiedades del material basándose solo en uno de los dos métodos (por ejemplo, si el espesor se utiliza en cualquier cálculo, la resistencia basada en el área del laminado grueso debe utilizarse en los cálculos como buena). Las propiedades informadas deben ajustarse estadísticamente restando tres desviaciones estándar de la tensión media de tracción a la tensión.

Tabla 8 Propiedades de la Sección 2-2 de VA 2-6 (50x70)

<i>Propiedades Sección</i>	<i>Magnitud</i>
<i>Longitud de la viga (L)</i>	<i>12.55 m</i>
<i>Ancho de la viga (b)</i>	<i>500 mm</i>
<i>Altura efectiva (d)</i>	<i>610 mm</i>
<i>Altura de la viga (h)</i>	<i>700 mm</i>
<i>Resistencia especificada a la compresión (f'_c)</i>	<i>21 N/mm²</i>
<i>Resistencia a la fluencia del acero de refuerzo (f_y)</i>	<i>420 N/mm²</i>
<i>Resistencia de diseño a flexión sin refuerzo FRP (ϕMn)</i>	<i>694 kN-m</i>
<i>Acero de refuerzo para momento positivo (A_s)</i>	<i>3201 mm²</i>

6.2.2 Cargas y momentos correspondientes

En la Tabla 9 se resumen las cargas existentes y nuevas y los momentos asociados en la zona estimada de cortante para la viga. Para la determinación de las sollicitaciones existentes se consideró una carga muerta distribuida en la losa de 6.24 kN/m² (sin incluir el peso de la viga).

Tabla 9 Cargas Existentes y Nuevas - Momentos en Zona de flexión.

Tipo de carga	Cargas Existentes	Cargas Nuevas
Cargas muertas (W_{DL})	32.6 N / mm	32.6 N/mm
Carga Viva (W_{LL})	7.8 N / mm	46.5 N/mm
Cargas de Servicio ($W_{DL} + W_{LL}$)	40.4 N / mm	79.1 N/mm
Límite carga sin refuerzo FRP ($1.1W_{DL} + 0.75W_{LL}$)	N / A	70.74 N/mm
Cargas Mayoradas ($1.2W_{DL} + 1.6W_{LL}$)	51.6 N / mm	113.52 N/mm
Momento de Carga muerta M_{DL}	270 kN-m	270 kN-m
Momento por Carga Viva M_{LL}	64 kN-m	385 kN-m
Momento de Servicio M_s ($M_{DL} + M_{LL}$)	334 kN-m	655 kN-m
Momento sin refuerzo FRP ($1.1M_{DL} + 0.75M_{LL}$)	N / A	586 kN-m
Momento sin refuerzo FRP ($1.0M_{DL} + 1.0M_{LL}$)	N / A	655 kN-m
Momento Mayorado M_u ($1.2M_{DL} + 1.6M_{LL}$)	427 kN-m	941 kN-m

Tabla 10 Propiedades del sistema FRP entregadas por el fabricante

Propiedades Sección	Unidades
Espesor por capa t_f	1.02 mm
Máxima resistencia a la tracción ff_u *	621 N/mm ²
Deformación de ruptura por tensión ϵ_{fu} *	0.015 mm/mm
Módulo de elasticidad de laminados de FRP E_f	37,000 N/mm ²

6.2.3 **Procedimiento de diseño para flexión positiva por cargas verticales.**

Tabla 11 Procedimiento paso a paso de reforzamiento a flexión con FRP.
(fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

<i>Procedimiento</i>	<i>Calculo en Unidades Métricas SI</i>
<p>Paso 1: Calcular las propiedades del material de diseño del sistema FRP</p> <p>La viga se encuentra en un espacio interior y se utilizará un material de CFRP. Por lo tanto, según la Tabla 9.1, se sugiere un factor de reducción ambiental de 0.95</p> <p style="text-align: center;">$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$</p>	<p>$f_{fu} = (0.95) (621 \text{ N/mm}^2) = 590 \text{ N/mm}^2$</p> <p>$\epsilon_{fu} = (0.95) (0.015 \text{ mm/mm}) = 0.0142 \text{ mm/mm}$</p>
<p>Paso 2 — Cálculos preliminares</p> <p>Propiedades del concreto: <i>β_1 de ACI 318-05, Sección 10.2.7.3</i></p> <p style="text-align: center;">$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$</p> <p>Propiedades del acero de refuerzo existente:</p> <p>Propiedades del refuerzo de FRP unido externamente:</p> <p style="text-align: center;">$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f$</p>	<p>$\beta_1 = 1.05 - 0.05 f'_c / 6.9 = 0.80$</p> <p>$E_c = 4700 \sqrt{21} = 21,54 \text{ N/mm}^2$</p> <p>$A_s = 4 \times (510 \text{ mm}^2) = 2040 \text{ mm}^2$ $3 \times (387 \text{ mm}^2) = 1161 \text{ mm}^2$</p> <p>$A_f = (3 \text{ plieg}) (1.02 \text{ mm/plieg}) (500 \text{ mm}) =$ $A_f = 1530 \text{ mm}^2$</p>
<p>Paso 3: Determinar el estado de tensión existente en la parte inferior:</p> <p>El estado de tensión existente se calcula asumiendo que la viga está fisurada y que las únicas cargas que actúan sobre la viga en el momento de la instalación de FRP son cargas muertas.</p> <p>Un análisis de sección fisurada de la viga existente tomamos $k = 0.334$ y</p>	<p>$\epsilon_{bi} = \frac{270 \text{ kN} \cdot \text{mm} (700 \text{ mm} - (0.334)(610 \text{ mm}))}{(2572 \times 10^6 \text{ mm}^4)(21.54 \text{ kN/mm}^2)}$</p> <p style="text-align: center;">$\epsilon_{bi} = 0.0000024$</p>

$I_{cr} = 2572 \times 10^6 \text{ mm}^4$ $\epsilon_{bi} = \frac{M_{DL} (d_f - kd)}{I_{cr} \cdot E_c}$	
<p>Paso 4: Determinar la tensión de diseño del sistema FRP:</p> <p>La tensión de diseño de FRP para el modo de falla de separación ϵ_{fd} se calcula utilizando la ecuación. (10-1.1)</p> $\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\epsilon_{fu}$ <p>Debido a que la tensión de diseño es más pequeña que la tensión de ruptura, la separación controla el diseño del sistema FRP</p>	$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{21,54 \frac{N}{\text{mm}^2}}{3 * \left(37,000 \frac{N}{\text{mm}^2}\right) (1.02 \text{ mm})}}$ $\epsilon_{fd} = 0.00565 \leq 0.9(0.0142) = 0.0128$
<p>Paso 5: Estimar c, la profundidad al eje neutro:</p> <p>Una estimación inicial razonable de c es 0.20d. El valor de la c se ajusta después de verificar el equilibrio.</p> $c = 0.20.d$	$c = 0.20 (610 \text{ mm}) = 122 \text{ mm}$
<p>Paso 6: Determine el nivel efectivo de tensión en el refuerzo de los FRP:</p> <p>El nivel de tensión efectiva en el FRP se puede encontrar en la ecuación. (10-2.5).</p> $\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} - \epsilon_{bi} \right) \leq \epsilon_{fd}$ <p>Tenga en cuenta que, para la profundidad del eje neutro seleccionada, la separación de FRP estaría en el modo</p>	$\epsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{700\text{mm} - 122\text{mm}}{122 \text{ mm}} - 0.0000024 \right)$ $\epsilon_{fe} = 0.0142 \leq \epsilon_{fd}$ $\epsilon_{fe} = 0.0142 > 0.00693$ $\epsilon_{fe} = \epsilon_{fd} = 0.007$

<p>de falla porque la segunda expresión en esta ecuación controla. Si la primera expresión gobernara, entonces el aplastamiento del concreto estaría en el modo de falla.</p> <p>Debido a que los FRP controla la falla de la sección, la tensión del concreto en la falla ϵ_c puede ser menor que 0.003 y puede calcularse usando semejanza de triángulos:</p> $\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right)$	$\epsilon_c = (0.007 + 0.0000024) \left(\frac{122 \text{ mm}}{700 \text{ mm} - 122 \text{ mm}} \right)$ $\epsilon_c = 0.00119$
<p>Paso 7: Calcular la tensión en el acero de refuerzo existente:</p> <p>La tensión en el acero de refuerzo se puede calcular utilizando triángulos similares de acuerdo con la ecuación. (10-2.10a).</p> $\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left[\frac{d - c}{d_f - c} \right]$	$\epsilon_s = (0.007 + 0.0000024) \left[\frac{610 \text{ mm} - 122 \text{ mm}}{700 \text{ mm} - 122 \text{ mm}} \right]$ $\epsilon_s = 0.0048$
<p>Paso 8: Calcular el nivel de tensión en el acero de refuerzo y los FRP:</p> <p>Las tensiones se calculan utilizando la ecuación. (10-2.10b)</p> $f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y$ <p>y (10-2.6).</p> $f_{fe} = E_F \epsilon_{fe}$	$f_s = \left(200 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2} \right) (0.0048) \leq 0.420 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2}$ $f_s = 1.18 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2} \leq 0.420 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2}$ <p>Hence, $f_s = 0.420 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2}$</p> $f_{fe} = 37 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2} \times (0.00565) = 0.209 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2}$
<p>Paso 9: Calcular los resultantes de la fuerza interna y verifique el equilibrio:</p>	$\epsilon'_c = \frac{1.7(21)}{21538} = 0.00166$

Los factores de bloque de tensión del hormigón pueden calcularse utilizando ACI 318-05. Los factores de bloque de estrés aproximado también se pueden calcular en base a la relación de esfuerzo-deformación parabólica para el concreto de la siguiente manera:

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - \varepsilon_c}$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c^2}$$

donde ε'_c es la deformación correspondiente a f_c' calculada como:

$$\varepsilon'_c = \frac{1.7f'_c}{E_c}$$

El equilibrio de fuerzas se comprueba al verificar la estimación inicial de c con la ecuación. (10-2.10c).

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

Paso 11: Calcular los componentes de la resistencia a la flexión:

El diseño de la resistencia a la flexión se calcula utilizando la ec. (10-2.10d).

Contribución del acero a flexión:

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

Un factor de reducción adicional, $\psi_f = 0.85$, se aplica a la contribución del sistema FRP.

Contribución del sistema FRP a flexión:

$$\beta_1 = \frac{4(0.00166) - 0.00119}{6(0.00166) - 0.00119} = 0.621$$

$$\alpha_1 = \frac{3(0.00166)(0.00119) - (0.00119)^2}{3(0.621)(0.00119)^2}$$

$$\alpha_1 = 1.70$$

$$c = \frac{(3201 \text{ mm}^2) \left(420 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) + (1530 \text{ mm}^2) \left(0.209 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right)}{(1.70) \left(21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) (0.621)(500 \text{ mm})}$$

$$c = 121 \text{ mm} \cong 122 \text{ mm} ; \text{Cumple!!!!}$$

$$M_{ns} = 3201 \text{ mm}^2 420 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \left(610 \text{ mm} - \frac{0.621 * 121 \text{ mm}}{2} \right)$$

$$M_{ns} = 769.59 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_{ns} = 769.59 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

$$M_{nf} = (1530 \text{ mm}^2) (0.209 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}) \left(700 \text{ mm} - \frac{0.621 * 121 \text{ mm}}{2} \right)$$

$$M_{nf} = 211.83 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_{1c}}{2} \right)$	$M_{nf} = 211.83 \text{ KN} \cdot \text{mm}$
<p>Paso 12: Calcular la resistencia a la flexión del diseño de la sección</p> <p>La resistencia a la flexión del diseño se calcula utilizando la ecuación. (10-1) y (10-2.10d). Debido a que $\epsilon_s = 0.0083 > 0.005$, un factor de reducción de la resistencia de $\phi = 0.90$ es apropiado por Eq. (10-2.7).</p> <p style="text-align: center;">$\phi M_N = \phi (M_{ns} + \Psi_f M_{nf})$</p>	<p style="text-align: center;">$\phi M_N = (0.90)(769.59 \text{ kN} \cdot \text{mm} + (0.85)211.83 \text{ kN} \cdot \text{mm}) = 951 \text{ kN} \cdot \text{mm}$</p> <p style="text-align: center;">$\phi M_n = 950.54 \text{ kN} \cdot \text{mm} \geq M_u = 941 \text{ kN} \cdot \text{m}$</p> <p style="text-align: center;"><u><i>∴ La sección reforzada es capaz de soportar la nueva fuerza de momento requerida.</i></u></p>

6.3 Diseño de reforzamiento para cortante con laminados de FRP.

Para analizar la posibilidad de implementar refuerzo tipo CFRP por cortante en la viga caso de estudio se analizarán las solicitaciones y la configuración de la viga en la sección 1-1, que es donde se da el máximo cortante (solo se analizan cargas verticales). En la sección mencionada se tienen estribos cerrados No. 3 y una rama suplementaria No. 3 separados cada 100 mm. Según el análisis, la resistencia nominal de cortante proporcionada por el concreto es $V_c = 239 \text{ kN}$ y la resistencia nominal de cortante proporcionada por el refuerzo de acero del corte es $V_s = 548 \text{ kN}$. Por lo tanto, la resistencia de cortante de diseño de la viga existente es $\phi V_n (\text{existente}) = 472 \text{ kN}$. La fuerza de cortante requerida mayorada ($1.2W_{LD} + 1.6W_{LL}$), incluida la carga viva aumentada, a una distancia d alejada del apoyo es $V_u = 649 \text{ kN}$ (para la determinación de las solicitaciones existentes se consideró una carga muerta distribuida en la losa de 6.24 kN/m^2 (sin incluir el peso de la viga)). Como la solicitación V_u es mayor que la resistencia de diseño ϕV_n es necesario reforzar la viga por cortante en la sección analizada.

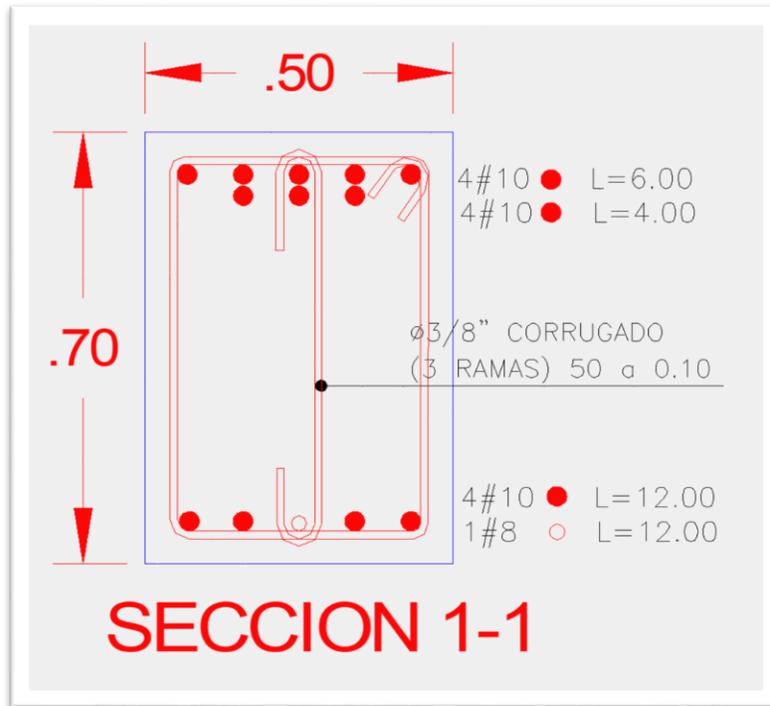


Figura 21 Sección 1-1 de Viga en Zona de Cortante. (fuente: Elaboración Propia)



Figura 22 Viga VA-2-6 (50x70) para Sección 1-1 de Cortante Losa 7 (fuente: Archivos Propios)



*Figura 23 Viga VA-2-6 (50x70) para Sección de Cortante Losa 9 con junta fría por vaciado irregular
(fuente: Archivos Propios)*



Figura 24 Viga VA-2-6 (50x70) para Sección 1-1 de Cortante Losa 9 (fuente: Archivos Propios)

6.3.1 Cálculo de las propiedades de Cortante del sistema FRP

El refuerzo de cortante de FRP suplementario está diseñado como se muestra en la Fig. 15.5 y se resume en la Tabla 12. Cada tira de FRP consta de una capa ($n = 1$) de una lámina de carbono flexible instalada por una capa húmeda. Las propiedades del material informadas por el fabricante del sistema FRP se muestran en la Tabla 13.

*Tabla 12 Configuración del refuerzo de cortante FRP suplementario
(fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))*

<i>Propiedades Sección</i>	<i>Unidades</i>
d	610 mm
dfv	600 mm
Ancho de cada hoja wf	254 mm
Intervalo entre cada hoja sf	305 mm
Longitud de la tira de FRP	1700 mm

*Tabla 13 Propiedades del sistema FRP entregadas por el fabricante
(fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))*

<i>Propiedades Sección</i>	<i>Unidades</i>
Espesor por capa tf	0.165 mm
Máxima resistencia a la tracción ffu *	3790 N/mm ²
Deformación de ruptura por tensión ϵfu *	0.017 mm/mm
Módulo de elasticidad de laminados de FRP Ef	227,530 N/mm ²

6.3.1 Procedimiento de diseño para cortante por cargas verticales.

Tabla 14 Procedimiento paso a paso de reforzamiento a Cortante con FRP.
(fuente: (ACI-440.2-R17, 2017))

Procedimiento	Calculo en Unidades Métricas SI
<p>Paso 1: Calcular las propiedades del material de diseño del sistema FRP</p> <p>La viga se encuentra en un espacio interior y se utilizará un material de CFRP. Por lo tanto, según la Tabla 9.1, se sugiere un factor de reducción ambiental de 0.95</p> $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = (0.95) (3790 \text{ N/mm}^2) = 3600.5 \text{ N/mm}^2$ $\varepsilon_{fu} = (0.95) (0.017 \text{ mm/mm}) = 0.01615 \text{ mm/mm}$
<p>Paso 2: Calcular el nivel de deformación efectivo en el refuerzo de cortante FRP:</p> <p>La tensión efectiva en FRP U-wrap se debe determinar usando el coeficiente de reducción de adherencia k_v. Este coeficiente se puede calcular utilizando las ecuaciones (11-4.1.2b) a (11-4.2.1e).</p> $Le = \frac{23300}{(n \cdot t_f \cdot E_f)^{0.58}}$ $k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3}$ $k_2 = \frac{d_{fv} - Le}{d_{fv}}$ $k_v = \frac{k_1 k_2 Le}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0.75$	$Le = \frac{23300}{((1) \cdot (0.165 \text{ mm}) \cdot (227.53 \times 10^3 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2})^{0.58}}$ $Le = 51.78 \text{ mm}$ $k_1 = \left(\frac{21 \text{ KN/mm}^2}{27}\right)^{2/3} = 0.846$ $k_2 = \frac{600 \text{ mm} - 51.78 \text{ mm}}{600 \text{ mm}} = 0.914$ $k_v = \frac{(0.846)(0.914)(51.78 \text{ mm})}{11900(0.01615)} \leq 0.75$ $k_v = 0.208 \leq 0.75$ $\varepsilon_{fe} = (0.208)(0.01615) \leq 0.004$

<p>La tensión efectiva se puede calcular utilizando la ecuación. (11-4.1.2a) como sigue:</p> $\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004$	$\varepsilon_{fe} = 0.0034 \leq 0.004$
<p>Paso 3: Calcular la contribución del refuerzo de FRP a la resistencia al corte:</p> <p>El área de refuerzo de cizallamiento de FRP se puede calcular como:</p> $A_{fv} = 2t_f w_f$ <p>La tensión efectiva en el FRP se puede calcular a partir de la ley de Hooke.</p> $f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f$ <p>La contribución de corte del FRP se puede calcular a partir de la ecuación (11-4a):</p> $V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha) d_{fv}}{s_f}$	$A_{fv} = 2(0.165\text{mm})(254\text{mm}) = 83.82 \text{ mm}^2$ $f_{fe} = (0.0034) \left(227.53 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2} \right) = 0.774 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2}$ $V_f = \frac{(83.82 \text{ mm}^2) (0.774 \frac{\text{KN}}{\text{mm}^2}) (1) (600\text{mm})}{(304.8\text{mm})}$ $V_f = 127.7 \text{ KN}$
<p>Paso 4 — Calcular la resistencia al corte de la sección:</p> <p>La resistencia al corte del diseño se puede calcular a partir de la ecuación. (11-2) con $\psi_f = 0.85$ para envoltura en U</p> $\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi V_f)$	$\phi V_n = 0.75(239 + 548 + 0.85(127.7))$ $\phi V_n = 671.7 \text{ KN}$ <p><i>∴ la sección reforzada es capaz de sostener la resistencia al cortante requerida</i></p> <p>$(\phi V_n = 671.7 \text{ KN} > V_u = 649 \text{ kN})$</p>

7 Conclusiones

1. Se mencionaron diferentes métodos para reforzar estructuras existentes de concreto reforzado. Las técnicas convencionales, que incluyen recrecidos o aumento de las secciones existentes o instalación de pesadas placas de acero, generalmente implican la alteración de la arquitectura original y un aumento significativo del peso de la estructura y/o la suspensión de la actividad de la edificación para hacer dicho reforzamiento. En contraste, el reforzamiento con materiales compuestos implica un aumento despreciable del peso de la estructura, es fácil de aplicar y no modifica la geometría original de los elementos, permitiendo conservar la arquitectura inicial de la estructura reforzada.
2. Se realizó una revisión bibliográfica de las técnicas de aplicación y del fundamento teórico del reforzamiento con laminados de materiales compuestos tipo FRP. Se encontró que los posibles modos de falla, cuando se utilizan FRP, están asociados a la baja resistencia de tracción del concreto y las interfaces con los adhesivos utilizados o, que a la falla de las propiedades mecánicas y físicas del material. No obstante, la exposición a la existencia de acciones destructivas externas también debe ser considerada.
3. Se analizaron las recomendaciones dadas en guías y estándares, nacionales e internacionales, con respecto a la utilización de FRP para reforzamiento de estructuras existentes. Desde el punto de vista local, el uso de materiales compuestos tipo FRP no está regulado en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (normativa sismorresistente vigente). Sin embargo, en el acta 105 de la Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes, de fecha 19 de junio de 2012, se indica que *“la Comisión no considera apropiado el uso de fibras de carbono*

y similares para la rehabilitación sísmica de estructuras”. Por otra parte, desde el punto de vista internacional, existen estándares y recomendaciones donde se dan recomendaciones para el uso de FRP. Unos de ellos son el ACI-440.2R-08 y ACI-440.2R-17.

4. Se realizó un ejemplo de diseño de reforzamiento con polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) para una viga de concreto reforzado de una estructura existente. El diseño, que se presentó en forma sistemática y según las recomendaciones del ACI-440.2R-17, se hizo para flexión y cortante considerando solamente cargas verticales. Se destaca lo siguiente:
 - a. En el diseño se atendieron con CFRP los déficits de flexión positiva (en el centro de la luz) y cortante (en un extremo) de la viga analizada debido a un incremento sustancial de la carga viva (por cambio de uso de la edificación). Se verificó que las capacidades de las secciones sin considerar refuerzo CFRP fuera consistente con las recomendaciones dadas en el ACI-440.2R-17.
 - b. El sistema FRP seleccionado no se concibió para mejorar la resistencia a la flexión en las zonas donde se espera se forme la articulación plástica por demandas sísmicas.
 - c. Los niveles aceptables de seguridad obtenidos para la ocurrencia de ambos estados límite de servicio (deflexiones excesivas y grietas) y estados límite últimos (flexión, esfuerzo de cortante, y deformación) se determinan mediante la verificación del esfuerzo nominal del miembro intervenido y en la evaluación de los posibles modos de falla y tensiones en cada material.

5. Desde el punto de vista sísmico, el refuerzo de cortante proporcionado por el sistema FRP debe ser localizado en la zona donde se espera la articulación plástica o la afectación de tensión y para mejoramiento post-fluencia al comportamiento de la flexión de los miembros en pórticos que resisten momentos por cargas sísmicas es más efectivo envolviendo por completo la sección. Asimismo, en columnas de concreto reforzado, el confinamiento de éstas mediante encamisado o envolturas de FRP se puede utilizar para mejorar su fuerza y ductilidad. Sin embargo, para mejora de la ductilidad se requiere cálculos más complejos para determinar la capacidad de un miembro para mantener la rotación y la deriva sin una pérdida sustancial de la fuerza.

8 Bibliografia

- ACI-369-R11. (2011). *Guide for seismic rehabilitation of existing concrete frame building and commentary*. Farmington Hills: McMaster University Library.
- ACI-440.2-R08. (2008). *Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills: McMaster University Library.
- ACI-440.2-R17. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills: McMaster University Library.
- An, W. S. (1991). RC beams strengthened with GFRP plates. II: Analysis and parametric Study. *J. Struct. Engrg., ASCE, 117(11)*, 3434-3455.
- Bogdanovic, B. (2002). Deflection calculations of FRP-reinforced concrete beams. *Department of Civil Engineering University of Manitoba, Report 23735*, 23.
- Borowicz, D. T. (2002). Rapid strengthening of concrete beams with powder-actuated fastening systems and fiber reinforced polymer (FRP) composite materials. *Thesis submitted in partial fulfillment for the requirements for the degree of Master of Science, University of Wisconsin-Madison*, 128.
- Chaallal, O. a. (2000). Effect of concrete strength on the Performance of FRP wrapped RC column under combined axial-flexural loading. *Technical report, Structural Research Center, Florida Department of Transportation, Tallahassee*, 192.
- Chaallal, O. a. (2000). Performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial-flexural loading. *ACI structural J.*, 97(4), 659-668.
- Deskovic, N. M. (1995). Innovative design of FRP combined with concrete: long-term behavior. *J. Struct. Engrg., ASCE, 121(7)*, 1995, 1079-1089.

- Deskovic, N. T. (1995). Innovative design of FRP combined with concrete: short-term behavior. *J. Struct. Engrg., ASCE, 121(7)*, , 1069-1078.
- EI-Refaie, A. F., & Ashour, A. F. (2003). Sagging and hogging strengthening of continuous reinforced concrete beams using carbon fiber-reinforced polymer sheets. *ACI structural J., 100(4)*, 446-453.
- Ei-Tawil, S. O. (2001). Static and fatigue analyses RC beams strengthened with CFRP laminates. *J. Composites for Construction, ASCE, 5(4)*, 258-267.
- Fam, A. Z. (2002). Flexural behavior of concrete-filled fiber-reinforced polymer circular tubes. *J. Composites for Construction, ASCE, 6(2)*, 123-132.
- Grace, N. F. (2004). Flexural response of CFRP Prestressed concrete box beams for highway bridges. *PCI Journal, 49(1)*, 92-104.
- Issa, M. S. (1994). Static response of fiberglass pretensioned columns. *J. Struct. Engrg., ASCE, 120(12)*, 3624-3648.
- Kawaguchi, K. [. (1993). Ultimate Strength and deformation characteristics of Concrete members reinforced with AFRP rods under combined axial tension or compression and bending. *SP-138, ACI*, 671-683.
- Lees, J. H. (1999). Experimental study of influence of bond on flexural behavior of concrete beams pretensioned with aramid fiber reinforced plastics. *ACI structural J., 96(3)*, 377-386.
- Mirmiran, A. Y. (2001). Design for slenderness in concrete columns internally reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *ACI structural J., 98(1), 2001*, 116-125.
- Naguib, W. a. (2002). Flexural creep test and modeling of concrete-filled fiber reinforced polymer tubes. *J. of Composites for Construction, ASCE, 6(4)*, 272-279.

- Plevris, N. a. (1994). Time-dependent behavior of RC members Strengthened with FRP laminates. *J. Struct. Engrg., ASCE, 120(3)*, 1017-1042.
- Popovics, S. (1970). A review of stress-strain relationships curves for concrete. *ACI J., 67(3)*, 243-248.
- Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete. *Cement and Concrete. Res., 3(5)*, 583-599.
- Rasheed, H. A. (2004). Simplified nonlinear analysis of Strengthened Concrete Beam based on a rigorous approach. *J. Struct. Engrg., ASCE, 130(7)*, 1087-1096.
- Recuero Alfonso, G. J. (1997). Refuerzo de Estructuras con materiales compuestos avanzados. *Instituto Eduardo Torroja – CSIC - Madrid. Informes de la Construcción Vol.49*, 452.
- Rodriguez, J. A.-O. (2001). M-P- ϕ Diagrams for reinforced, partially, and fully prestressed concrete sections under biaxial bending and axial load. *J. Struct. Engrg., ASCE, 127(7)*, 763-773.
- Rodriguez, J. A.-O. (2001). Reinforced, Partially, and Fully Prestressed Slender Concrete Columns under Biaxial Bending and Axial Load. *J. Struct. Engrg., ASCE, 127(7)*, 774-783.
- Ross, C. A., & Jerome, D. M. (1999). Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates. *ACI structural J., 96(2)*, 212-220.
- Saadatmanesh, H. (1994). Fiber composites for new and existing structures. *ACI structural J., 91(3)*, 346-354.
- Saadatmanesh, H. a. (1991). RC beams strengthened with GFRP plates I: Experimental Study. *J. Struct. Engrg., ASCE, 117(11)*, 3417-3433.

- Schnerch, D. F. (2002). FRP/Concrete hybrid rectangular tubes. *North Carolina State University-CFL Report No 02-03*, 42.
- Sen, R. I. (1994). Static response of fiberglass pretensioned Beams. *J. Struct. Engrg., ASCE*, *120(1)*, , 252-268.
- Shahawy, M. a. (1999). Static and fatigue performance of RC beams strengthened with CFRP laminates. *J. Struct. Engrg., ASCE*, *125(6)*, , 613-621.
- Thériault, M. a. (1998). Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams. *J. of Composites for Construction, ASCE*, *2(1)*, 7-16.
- Thiagarajan, G. (2003). Experimental and analytical behavior of carbon fiber-based rods as flexural reinforcement. *J. of Composites for Construction, ASCE*, *7(1)*, 64-72.
- Triantafillou, T. C. (1992). Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets. *ACI Structural Journal*, *89(3)*, 235-244.
- Vecchio, F., & Collins, M. P. (1986). The Modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Structural Journal*, *83(2)*, 219-231.
- Wight, R. G. (2001). M-A Prestressed FRP sheets for post-strengthening reinforced concrete beams. *J. of composites for construction, ASCE*, *5(4)*, 214-220.
- Yu, P. S. (2003). A Flexural performance of RC beams strengthened with Prestressed CFRP sheets. *Center for Infrastructure and Engineering Studies Department of Civil, Architectural, and Environmental Engineering University of Missouri-Rolla Rolla, MO, 65409-0030*, , 9.
- Zou, P.-X. W. (2003). Flexural behavior and deformability of fiber reinforced polymer prestressed concrete beams. *J. of Composites for Construction, ASCE*, *7(4)*, 275-284.

- Zou, P.-X. W. (2003). Flexural behavior and deformability of fiber reinforced polymer prestressed concrete beams. *J. of Composites for Construction, ASCE*, 7(4), 275-284.
- Zou, P.-X. W. (2003). Long-term deflection and cracking behavior of concrete beams prestressed with carbon fiber-reinforced polymer tendons. *J. of Composites for Construction, ASCE*, 7(3), 187-193.
- Zou, P.-X. W. (2003). Theoretical study on short-term and long-term deflections of fiber reinforced polymer prestressed concrete beams. *J. of Composites for Construction, ASCE*, 7(4), 285-291.