



**Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento
de estructuras de concreto reforzado**

Flabio Velásquez Vargas

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor

IC. Juan Carlos Vélez Cadavid

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras

Medellín, Antioquia, Colombia

2024

Cita	(Velásquez Vargas, 2024)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Velásquez Vargas, C. E. (2024). <i>Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado, 2024</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XI.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A Dios, por darme sabiduría, paciencia y las fuerzas necesarias para culminar este proyecto.

A mi Padre “Cobo”, a mis hermanos Nelson, Milena y Alba, que desde el cielo son esa luz que cada día me iluminan y me dan más fuerzas para continuar con mi camino, sueños y metas.

A mi Madre, por estar a mi lado, por su apoyo incondicional, por cuidarme, protegerme y ser ese ejemplo de lucha, esfuerzo y resiliencia en la vida.

Y finalmente a mis demás hermanos, por su amor, respeto y apoyo que me brindan cada día.

Agradecimientos

Agradezco a Dios principalmente por bendecir e iluminar mi vida, por guiarme y darme fortaleza en aquellos momentos de dificultad y debilidad.

Gracias en especial a Juan Felipe Álvarez, por ser ese ángel que Dios coloco en mi camino, gracias por ser mi amigo incondicional, hermano, jefe. Gracias por su apoyo, por brindarme todas las herramientas necesarias para culminar y seguir adelante con mi proyecto de vida.

Gracias a todas esas otras personas que están a mi lado y constantemente me dan su apoyo y me animan a seguir adelante, infinitamente gracias totales a todos ellos.

Flabio Velásquez Vargas

Contenido

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
Glosario	4
Glosario de los términos técnicos más utilizados	4
1. Planteamiento del problema	9
2. Justificación	10
3. Objetivos	11
3.1 Objetivo General	11
3.2 Objetivos Específicos	11
3.3 Objetivo Técnico	11
4. Revisión de literatura	12
4.1 La Fibra de Carbono Como Refuerzo	15
4.1.1.2 Tejidos	18
4.1.1.3 Barras.....	18
4.1.1.4 Laminados	19
4.1.1.5 Mechas.....	20
4.1.1.6 Resinas.....	21
<i>Resina de Imprimación</i>	22
<i>Resinas Fluidas</i>	22
4.2 Filosofía de los Diseños de Refuerzo con Fibras de Carbono	22
5. Ejemplo de aplicación para un caso de estudio	25
5.1 Descripción caso de estudio	25
5.2 Ensayos de campo	28
5.2.1 Núcleos.....	28
5.2.3 Ensayo de Esclerómetro	31
5.2.4 Ensayo de escáner y regatas	34
6. Evaluación de capacidad	37
6.1 Software utilizado.....	37
6.2 Análisis de cargas	37
6.2.1 Peso Específico.....	37
6.2.2 Carga viva.....	37
6.3 Análisis estructural	38
6.4 Vigas reforzadas	39

6.5.1 Solicitaciones Últimas	40
6.5.2 Capacidad Estructural.....	42
6.5.3 Evaluación Demanda – Capacidad	47
7. Guía de cálculo y diseño del refuerzo de “FRP”	48
7.1 Verificaciones previas	49
7.2 Refuerzo a flexión	49
7.2.1 Calcular el diseño del sistema FRP (propiedades del material).....	52
7.2.2 Cálculos Preliminares	52
7.2.3 Determinar el estado existente de tensión en la viga	53
7.2.4 Determinar la tensión de diseño del sistema FRP	54
7.2.5 Estimación de C, profundidad al eje Neutral.....	54
7.2.6 Nivel efectivo de tensión en el refuerzo FRP	55
7.2.7 Calcular la deformación en el acero de refuerzo existente.	56
7.2.8 Calcular el nivel de tensión en el acero de refuerzo y en el FRP	56
7.2.9 Calculo de las fuerzas internas y verificación de equilibrio.	57
7.2.10 Ajuste de “c” hasta alcanzar el equilibrio de fuerzas	59
7.2.11 Componentes de la resistencia a la Flexión.....	59
7.2.12 Tensiones de servicio en el acero de refuerzo y en el FRP	61
7.2.13 Limite de ruptura por fluencia al servicio del FRP.....	62
8. Sistemas convencionales de rehabilitación de estructuras vs sistema frp	66
8.1 Refuerzo mediante recrecido con concreto armado.....	67
8.1.1 Diseño reforzamiento con recrecimiento de la sección de la viga para el caso de estudio.....	68
8.2 Refuerzo mediante perfiles metálicos.....	70
9. Conclusiones.....	73
10. Bibliografía.....	75
Bibliografía.....	75

FIGURAS

Figura 1. Sistema compuesto a base de "FRP". Manual Masters Builders Solutions.	13
Figura 2. Diferentes tipos de fibra y comparación tensión-deformación. Manual Master Builders Solutions.....	13
Figura 3. Reforzamiento de elementos de concreto armado con sistemas "FRP". Manual SIKA.	16
Figura 4. Imagen de formatos de Fibra de Carbono.....	17
Figura 5. Imagen de la fibra en forma de tejido.	18
Figura 6. Barras de fibra de carbono.	19
Figura 7. Imagen de láminas de fibra de carbono instaladas a flexión en vigas.....	19
Figura 8. Imagen del "FRP" en forma de mechas.	20
Figura 9. Diagrama tensión/deformación del concreto-acero-FRP.	24
Figura 10. Imagen Puente Rio Grande entre los municipios de Don Matías y Santa Rosa de Osos.....	26
Figura 11. Geometría sección Transversal.	27
Figura 12. Imagen de vigas, losa y riostras del puente Rio Grande.	27
Figura 13. Imagen núcleo extraído para el ensayo de compresión del concreto.	29
Figura 14. Imagen del ensayo de fenolftaleína aplicado a los cilindros de concreto.	30
Figura 15. Imagen ensayo de Esclerometría en losa, vigas y riostras.	31
Figura 16. Imagen regata losa superior.	35
Figura 17. Imagen regata 3. Viga reforzada 2.	36
Figura 18. Esquema del refuerzo regata viga reforzada 2.	36
Figura 19. Vehículo C36-14.	38
Figura 20. Modelo Estructural.....	38
Figura 21. Carriles de diseño. Vigas principales.	40
Figura 22. Envoltorio de solicitaciones Viga Exterior.	41
Figura 23. Envoltorio de solicitaciones Vigas Interiores.	41
Figura 24. Sección Viga "T".	43
Figura 25. Diagrama de deformaciones Unitarias y Diagrama de Fuerzas Momento resistente positivo.....	44
Figura 26. Viga Rectangular	46
Figura 27. Diagrama de Deformaciones Unitarias y Diagrama de Fuerzas Momento Negativo.	46
Figura 28. Esquema de la viga idealizada simplemente apoyada con Reforzamiento FRP externamente.....	51
Figura 29. Comparación del aumento de resistencia de un sistema de "FRP" con el recrecimiento de una sección en una viga de concreto armado	73

TABLAS

Tabla 1. Características mecánicas de las fibras. Datos norma ACI-440	14
Tabla 2. Tipos y usos de Fibra de Carbono en diferentes elementos estructurales.	21
Tabla 3. Tipos de Resinas y usos.....	22
Tabla 4. Resistencia a la Compresión de núcleos extraídos.	29
Tabla 5. Resultados del ensayo con el Esclerómetro.....	34
Tabla 6. Regatas.	35
Tabla 7. Sobre carga por metro lineal. (Ton/m).	39
Tabla 8. Solicitaciones Ultimas	42
Tabla 9. Momento Resistente Positivo Vigas.....	42
Tabla 10. Momento Resistente Negativo Vigas.	44
Tabla 11. Cortante resistente a "d" del estribo.....	46
Tabla 12. Demanda - Capacidad Momento Positivo Vigas.....	47
Tabla 13. Demanda - Capacidad Momento Negativo Vigas.	47
Tabla 14. Demanda - Capacidad Cortante a "d" del estribo.	48
Tabla 15. Cargas y Momentos Correspondientes.	51
Tabla 16. Propiedades del sistema FRP.....	52

Resumen

Saber de antemano que las estructuras de concreto armado presentan con frecuencia ciertas patologías estructurales que pueden ser causadas por errores de diseño, fallas de construcción, mala calidad de los materiales, cambio en el uso de la estructura, falta de mantenimiento, y otros factores; puede conducir a un aumento en la carga final a la cual la estructura no está diseñada para soportar. Estas patologías han aumentado la demanda de servicios de rehabilitación y mantenimiento de estructuras que sumados a los efectos ambientales han conllevado a optar por el reforzamiento de la estructura. Igualmente, debido al elevado índice de ocurrencia de sismos, el reforzamiento estructural se viene utilizando desde varias décadas atrás.

Para este caso de estudio, el principal objetivo es determinar de qué manera el uso de fibra de carbono influye en el reforzamiento estructural en los elementos con déficit en cuanto a resistencia y/o deformabilidad. Para tal fin, se optó por una metodología aplicada, con nivel explicativo y diseño experimental, los datos fueron recolectados aplicando la técnica del fichaje y de la observación a cada de las muestras de los distintos ensayos realizados.

Las operaciones que se solicitan para la reparación de una estructura son intervenciones delicadas que requieren un alto nivel de ingeniería que garanticen la seguridad del resultado y de una correcta y debida implementación de la revisión bibliográfica existente de procesos constructivos, de tal manera que podamos garantizar una recuperación de cualquier elemento estructural y poder habilitarlo a los niveles de resistencia exigidos, cumpliendo con las normas técnicas requeridas.

En resumen, la fibra de carbono ofrece soluciones avanzadas para la ingeniería Civil, especialmente en el refuerzo de estructuras existentes, aunque su alto costo sigue siendo una consideración importante, es un material altamente valorado por sus propiedades excepcionales.

Abstract

Know in advance that reinforced concrete structures frequently present certain structural pathologies that can be caused by design errors, construction failures, poor quality of materials, change in the use of the structure, lack of maintenance, and other factors; can lead to an increase in the ultimate load that the structure is designed to support. These pathologies have increased the demand for structural rehabilitation and maintenance services, which, added to the environmental effects, have led to opting for structural reinforcement. Likewise, due to the high rate of earthquake occurrence, structural reinforcement has been used for several decades.

For this case study, the main objective is to determine how the use of carbon fiber influences the structural reinforcement in elements lacking in resistance and/or deformability. For this purpose, an applied methodology was chosen, with an explanatory level and experimental design, the data were collected by applying the recording and observation technique to each of the samples from the different tests carried out.

The operations requested for the repair of a structure are delicate interventions that require a high level of engineering that guarantees the safety of the result and a correct and due implementation of the existing bibliographic review of construction processes, in such a way that we can guarantee a recovery of any structural element and being able to enable it at the required resistance levels, complying with the required technical standards.

In summary, carbon fiber offers advanced solutions for Civil Engineering, especially in the reinforcement of existing structures, although its high cost remains an important consideration, it is a material highly valued for its exceptional properties.

Introducción

Los sistemas compuestos estructurados con fibras de carbono, CFC, pueden ser utilizados con seguridad para:

-Rehabilitar o restaurar elementos estructurales de concreto armado debilitados o fragilizados por patologías específicas.

-Reforzar elementos en buenas condiciones estructurales (sin patología), para permitir el aumento de las cargas solicitantes, para cumplir cambios de uso o para corregir y minimizar eventuales riesgos, derivados de vicios de diseño o de construcción.

Con el caso de estudio puesto a consideración se buscará determinar si los sistemas compuestos estructurados con fibras de carbono (CFC), son efectivamente una alternativa viable y/o recomendable para el refuerzo estructural, antes de que se haya decidido y escogido el tipo de sistema a ser utilizado. Para que sea confirmada con suficiente certeza la conveniencia de la utilización de un determinado sistema (CFC) para aplicación estructural específica y particular, se deberá evaluar con criterio, la estructura implicada, para establecer de la manera más exacta posible y con margen de seguridad confiable, su capacidad resistente en aquel instante, identificar de la manera más completa posible, cualquier deficiencia o anomalía que exista y que pueda influenciar significativamente en su seguridad, determinando sus orígenes (causas) e investigar la integridad (condiciones) del substrato del concreto. Los procesos de evaluación y ejecución estructural deberán necesaria y obligatoriamente incluir minuciosas investigaciones, evaluaciones y estudios de campo, que conformaran los documentos técnicos que orientaran y corroboraran la evaluación y aplicación requerida de los sistemas (CFC) y que se deberán ejecutar de acuerdo con las normas técnicas estructurales vigentes.

La investigación sobre la literatura disponible sobre la aplicación de los sistemas compuestos

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

estructurados con fibras de carbono y la información técnica de los fabricantes, será de gran importancia, ya que nos aseguraremos que su recomendación es apropiada y confiable, dentro los límites impuestos por aquellas fuentes de consulta.

Glosario

Glosario de los términos técnicos más utilizados

A

Adhesivo Estructural – agente de adhesión utilizado para la transferencia de las cargas existentes entre los elementos adherentes.

Agente de Curado – catalizador o agente reactivo que, cuando es adicionado a la resina, produce su polimerización. También denominado endurecedor o iniciador.

Alcalinidad – condición de tener o contener iones de hidroxilo (OH⁻): conteniendo sustancias alcalinas.

Aplicación de Adhesión Crítica – aplicación de sistemas CFC para refuerzo de estructuras que necesitan quedar perfectamente adheridas al sustrato de concreto.

Aplicación de Contacto Crítico - aplicación de sistemas CFC para refuerzo de estructuras de concreto armado que necesitan un contacto estrecho entre el sustrato de concreto y el CFC para funcionar a satisfacción.

B

Barra de CFC – construcción limitada por resina normalmente hecha con fibras continuas en forma de barras, mallas o cables utilizados para reforzar un axialmente el concreto.

C

Capa – la aplicación simple de una lámina o tejido del material fibroso. Capas múltiples, cuando son

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

moldeadas juntas, producen lo que se denomina laminado.

Capa protectora – capa de acabado que se utiliza para la protección del sistema compuesto contra la acción de la luz ultravioleta, abrasión y derrames o salpicaduras de productos químicos. Poseen también un efecto estético porque pueden reproducir diversas coloraciones y acabados.

CFC – sistemas compuestos estructurados con fibras de carbono.

Compuesto – la combinación de dos o más materiales que difieren entre sí en la composición y en la forma, en escala macro. Los constituyentes retienen sus identidades; estos no se disuelven o se mezclan completamente uno en el otro, aunque actúan conjuntamente. Normalmente, los componentes pueden ser identificados físicamente y exhibir una interface entre sí.

Contenido de Resina – la cantidad de resina en un laminado expresado ya sea por el porcentaje de la masa o por el volumen total.

Cable de CFC - construcción limitada con resina y hecha con fibras continuas en forma de cable, utilizada para reforzar uniaxialmente el concreto. Los cables son usualmente utilizados para el refuerzo del concreto pretensado.

Curado – proceso que causa una transformación irreversible en las propiedades de las resinas por medio de reacciones químicas. El curado es típicamente complementado o afectado por la adición de agentes o aceleradores de curado con o sin temperatura y presión.

El curado completo se obtiene cuando la resina alcanza las propiedades específicas. Sub-curado es la condición en que estas propiedades especificadas no son alcanzadas.

Creep - rotura bajo carga mantenida o fluencia lenta

Ⓓ

Degradación – declinación de la calidad de las propiedades mecánicas del material.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Delaminación – separación que ocurre en un plano paralelo a la superficie, como en la separación entre sí de las capas de un laminado de compuesto.

Despegue – la separación en la interface entre el sustrato de concreto y la capa de refuerzo.

Desprendimiento – ver despegue.

Durabilidad – la capacidad del material para resistir a la intemperie, ataques químicos, abrasión y otras condiciones de servicio.

Durabilidad a la Fatiga - el número de ciclos de carga o deformación necesaria para llevar a la falla del material, elemento estructural o muestra de la prueba.

Ⓔ

Epóxico – polímero con polimerización de endurecimiento por calor conteniendo uno o más grupos epóxicos, curado por medio de reacciones con fenoles, aminas poli funcionales, anhídridos y ácidos carboxílicos. Es una importante resina en los compuestos, también utilizado como adhesivo estructural.

F

Ⓕ

Fibra – termino genérico para referirse a materiales filamentosos. La menor unidad de un material fibroso. Frecuentemente, el termino fibra es usado como sinónimo de filamento.

Fibra de Aramida - Fibra orgánica altamente orientada.

Fibra de Carbono – fibra producida por medio de tratamiento térmico de una fibra precursora orgánica, tal como el Poliacrilonitrilo (PAN), en un ambiente inerte.

Fibra Precursora - fibras de las cuales la fibra de carbono es derivada, tales como rayón,

Poliacrilonitrilo o alquitrán.

Ⓖ

Impregnación – es el proceso de saturación de los intersticios de las fibras de refuerzo o de sustrato

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

con la resina.

Inhibidor - sustancia que retarda una reacción química. También es utilizado en ciertos tipos de monómeros y resinas para prolongar el tiempo permitido de almacenamiento.

Interface – la frontera o la superficie entre dos medios diferentes, físicamente distintos entre sí.

Ⓛ

Lámina de Fibra Seca – lámina flexible compuesta de varios filamentos del material de fibra ordenados según una orientación común en un plano.

Laminado - una o más capas de fibras contenidas en una matriz curada de resina.

Lote – la cantidad de material fabricada durante un mismo proceso de producción, donde las variables de producción permanecen esencialmente constantes.

Ⓜ

Matriz – resina o polímero homogéneo en el cual el sistema de fibras del compuesto esta embebido.

Micro fisuras – fisuras formadas en los compuestos cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia de la matriz.

Montaje Superficial – de NSM (Near Surface Mounted), disposición de barras de compuestos incrustados en ranuras de pequeña profundidad abiertas en el substrato de concreto, por encima de los estribos existentes.

Ⓞ

Orientación de las Fibras – orientación de los filamentos en una lámina de fibra seca, expresada como una medida angular que se mide respecto al eje longitudinal de los elementos reforzados.

P

Ⓟ

PAN – Poliacrilonitrilo, fibra precursora para la fabricación de la fibra de carbono.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Polimerización – reacción química en la cual las moléculas de monómeros se ligan unas a otras para formar moléculas mayores donde el peso molecular es múltiplo del de las sustancias originales.

Polímero – el compuesto formado por la reacción de moléculas simples que, combinadas en condiciones controladas, producen material con alto peso molecular.

Ⓡ

Resina – el componente del sistema polimérico que requiere un catalizador o un endurecedor para su polimerización o curado en su utilización en los compuestos.

Resistencia a la Fatiga – la mayor tensión que puede ser sostenida sin ruptura para un determinado número de ciclos de carga.

Ruptura por Fluencia – ruptura del material debido a la acumulación de deformación por carga a lo largo del tiempo.

Ⓢ

Substrato de Concreto – el substrato de concreto es definido como el concreto original y cualquier material cementante utilizado para la reparación o la recomposición del concreto original. El substrato puede ser constituido únicamente del concreto original o íntegramente de materiales utilizados para reparación o de la combinación del concreto original y materiales de reparación. El substrato incluye la superficie sobre la cual será instalado el sistema compuesto.

Ⓣ

Tejido – arreglo de fibras tejidas juntas en dos direcciones. El tejido puede ser entrelazado o no, comprimido o cosido.

Tiempo Útil de Manejo – se refiere al periodo en que una resina epóxica ya catalizada puede ser trabajada con espátula o rodillo. También es conocido como tiempo de trabajabilidad.

Termoestable – resina formada por una ligación cruzada de cadenas poliméricas, no pudiendo ser derretida o reorganizada por medio de la aplicación de calor.

Termoplástico – resina que no posee una ligación cruzada, pudiendo generalmente ser repetidamente derretida o reorganizada por medio de la aplicación de calor.

1. Planteamiento del problema

Una de las razones fundamentales por las que se producen fallas y errores en las diferentes actividades constructivas en una obra civil, se deben en gran parte por el desconocimiento que se posee de los procesos constructivos que la obra conlleva. Así mismo nunca se podrá programar una obra cuyos procesos se desconocen o tienen limitaciones. También es utópico pensar que se estará apto para supervisar o dirigir procesos constructivos que se desconozcan.

Cada año se destinan para obras civiles elevados presupuestos, pero no se invierte en un seguimiento a la calidad de las mismas. Las estructuras pueden presentar insuficiencias ya sea por construcciones deficientes, deterioro del concreto, corrosión del acero de refuerzo, cambios en la funcionalidad de su estructura o aumento de cargas estimados en el diseño. Por ello es de vital importancia el hacerles un seguimiento a las estructuras a lo largo de su vida útil y en caso de ser necesario poder intervenirlas y realizar las respectivas correcciones.

La vida útil de una estructura no es solo cuestión de tiempo, sino que también depende del esfuerzo y la motivación de los diferentes actores en la sociedad por mantenerlas, protegerlas y conservarlas; gestionando los recursos necesarios para tal fin, considerando siempre el servicio que presta, la apropiación e identidad que genera para su entorno, historia y paisaje. Estamos acostumbrados a que

la opinión pública centra sus intereses en los casos nacionales, pero muchas necesidades a nivel local deben ser atendidas de igual forma. En el país no se puede volver algo común las fallas y colapsos en las estructuras, por eso es el reto de hacer el seguimiento necesario y oportuno y poder atender los casos que se identifiquen.

2. Justificación

Podemos observar actualmente el uso de reforzamiento con fibras de carbono (FRP) mucho más que en años anteriores para las posibles fallas estructurales que se presenten en las diferentes obras civiles, por lo que su implementación será una excelente alternativa como refuerzo estructural.

El aumento de la resistencia de las estructuras existentes mediante sistemas convencionales, tales como el incremento de sección de los elementos, la unión de secciones metálicas, el empleo de tensores externos, etc. Pueden resultar muy costosos en cuanto a tiempo de ejecución y entrada en servicio y, en algunos casos, son imposibles de ejecutar al no poder acomodar la carga muerta y el espacio requerido. Los materiales compuestos a base de Polímeros Reforzados con Fibras (FRP) en forma de tejidos o laminados han ido convirtiéndose en una técnica alternativa de reforzamiento de elementos estructurales de concreto armado con relación a los métodos tradicionales de reforzamiento.

El uso de los FRP como materiales de refuerzo para estructuras existentes es una de las tecnologías que puede llegar a resultar de mayor aplicación en la industria de la construcción debido a las ventajas que ofrece, como lo puede ser las altas relaciones resistencia –peso y rigidez-peso, las cuales mejoran el comportamiento de la estructura sin que se altere su configuración geométrica. Asimismo, los FRP son livianos y no demandan cambios en la distribución del sistema estructural o en la cimentación. Además, en el caso de construcciones sometidas a ambientes especiales presentan alta resistencia a la corrosión.

Una muestra del creciente interés mostrado por este sistema de reforzamiento viene dada por las recomendaciones de diseño y construcción que se están publicando en los últimos años en diferentes países. Estas recomendaciones intentan proporcionar una guía adecuada para su dimensionamiento y aplicación.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Realizar la respectiva evaluación de capacidad estructural de un caso existente y proponer la aplicación de los sistemas estructurales con fibras de carbono, procurando presentar de manera práctica y condensada una compilación de la revisión bibliográfica existente sobre el tema, principalmente buscado ser una referencia útil y de consulta.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar las normas técnicas, para poder utilizar el sistema como refuerzo de estructuras concreto armado.
- Incrementar los conceptos fundamentales de aplicación de los sistemas con FRP, para realizar una correcta ejecución en las diferentes etapas constructivas y así garantizar su nivel de servicio.
- Analizar y profundizar en 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.

3.3 Objetivo Técnico

Presentar la información correspondiente a los resultados de la revisión estructural del puente existente,

atendiendo a todas las consideraciones exigidas por el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. De acuerdo con los resultados se darán las recomendaciones y se calcularán los sistemas de reforzamiento apropiados para cada uno de los elementos que lo requieran ya sea por resistencia o por deformación.

4. Revisión de literatura

A principios de los años 40 se produjo un derrame accidental de resina de poliéster en un laboratorio sobre varias capas de tejido de vidrio. Gracias a la curiosidad del técnico responsable se procedió a la evaluación de las capacidades mecánicas del tejido impregnado, aportando unos resultados sorprendentes. Éste fue el inicio de los compuestos o plásticos reforzados, materiales plenamente habituales en la actualidad y que se pueden encontrar por todos lados.

Con los compuestos se diseñó un nuevo material de construcción; reuniendo moléculas de origen orgánico en forma de polímeros, cuyas propiedades habían sido diseñadas, con fibras naturales o sintéticas de propiedades ya conocidas, en una estructura conjunta que proporcionaba una relación resistencia/peso no conocida hasta entonces. Esto permitió al diseñador o proyectista la elaboración de formas y estructuras con comportamientos predecibles y controlables.

Los materiales compuestos deben su nombre a que están formados por la unión de dos o más materiales de características físicas y mecánicas distintas, con el fin de obtener un nuevo material que permita aprovechar óptimamente las prestaciones de cada material individual.

Los materiales compuestos a base de “FRP” se han venido utilizando, desde hace más de 50 años, principalmente en la industria aeronáutica. Posteriormente, su campo de aplicación se ha ido extendiendo

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de "FRP" para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

a la industria náutica, automotriz, a las telecomunicaciones y a la Ingeniería Civil.



Figura 1. Sistema compuesto a base de "FRP". Manual Masters Builders Solutions.

En definitiva, estos materiales desde el punto de vista constructivo, están formados por dos componentes, una matriz y unas fibras, como se muestra en la figura 1, que actúan de una manera conjunta y solidaria. Consiguiendo, de esta manera, unas prestaciones óptimas, principalmente en cuanto a comportamiento mecánico. (Crespo, 2006).

Entre los distintos tipos de fibras (carbono, vidrio, Aramida; ver figura 2) que pueden servir para este uso, las de uso más extendido son las de carbono. Son las que tienen un módulo de elasticidad más alto, compatible con la deformación del hormigón armado.

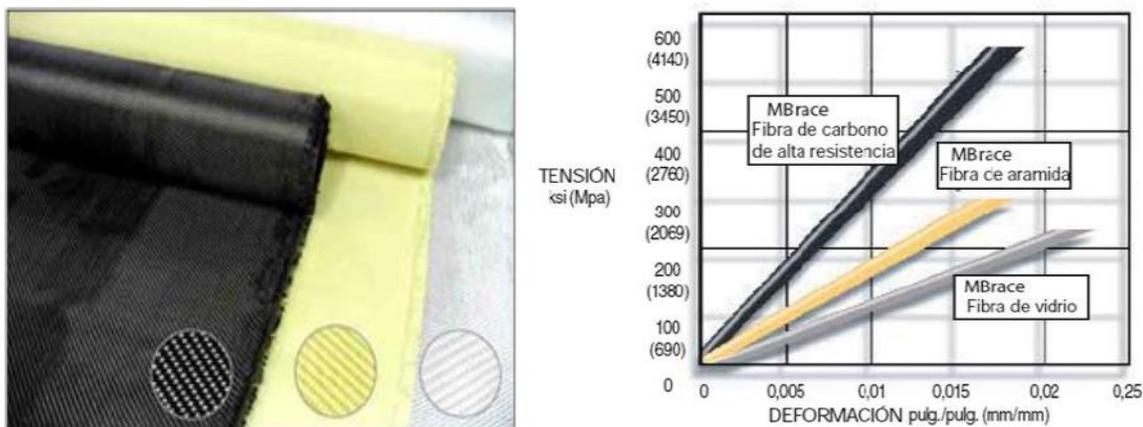


Figura 2. Diferentes tipos de fibra y comparación tensión-deformación. Manual Master Builders Solutions.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

En cuanto a las matrices, la más compatible con las fibras, en especial con la de carbono, ha demostrado ser la resina epoxi. Es la que mejor imprima las fibras y la que más adherencia tiene a ellas. Además, tiene un curado sin retracción, lo cual es importante para el uso al que va destinado.

En la *tabla 1* se recogen las características mecánicas de las fibras antes mencionadas, características que no son aplicables al material compuesto, ya que variarán cuando las fibras se combinen con la matriz para generar el material aplicable para realizar el refuerzo.

<i>TIPOS DE FIBRA</i>	<i>Módulo de Elasticidad (GPa)</i>	<i>Resistencia a Tensión (Mpa)</i>	<i>Deformación de Ruptura (%)</i>
<i>CARBONO</i>			
<i>Alta Resistencia</i>	<i>215-235</i>	<i>3500-4800</i>	<i>1,4-2,0</i>
<i>Súper Alta Resistencia</i>	<i>215-235</i>	<i>3500-6000</i>	<i>1,5-2,3</i>
<i>Alto Modulo</i>	<i>350-500</i>	<i>2500-3100</i>	<i>0,5-0,9</i>
<i>Súper Alto Modulo</i>	<i>500-700</i>	<i>2100-2400</i>	<i>0,2-0,4</i>
<i>VIDRIO</i>			
<i>E-Glass</i>	<i>70</i>	<i>1900-3000</i>	<i>3,0-4,5</i>
<i>S-Glass</i>	<i>85-90</i>	<i>3500-4800</i>	<i>4,5-5,5</i>
<i>ARAMIDA</i>			
<i>Bajo Modulo</i>	<i>70-80</i>	<i>3500-4000</i>	<i>4,3-5,0</i>
<i>Alto Modulo</i>	<i>115-130</i>	<i>3500-4000</i>	<i>2,5-3,5</i>

Tabla 1. Características mecánicas de las fibras. Datos norma ACI-440

Las principales funciones de las fibras FRP son: a) aportar la resistencia requerida frente a un esfuerzo de tracción. Aportar rigidez (elevado módulo elástico), entre otros parámetros. b) Conductividad o aislamiento eléctrico, dependiendo del tipo de fibra. c) la matriz aporta propiedades vitales al material compuesto, mejorando su rendimiento: Obliga a las fibras a trabajar de forma conjunta, y les transfiere los esfuerzos de tracción. d) aísla las fibras entre ellas, y así trabajan de forma separada. Ello evita o ralentiza la propagación de fisuras en el soporte. f) la matriz actúa como un revestimiento de protección de las

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

fibras, protegiéndolas frente a ataques mecánicos (golpes) y químicos (ambiente, sustancias agresivas, etc.). g) las fibras de carbono son conductivas, mientras que las de Aramida y vidrio son aislantes.

Las resinas y las fibras de los sistemas con FRP se pueden ver seriamente afectadas debido a las condiciones medioambientales existentes en el lugar del reforzamiento. Propiedades mecánicas importantes como: la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad se ven degradadas cuando estos materiales se exponen en ciertos ambientes agresivos como son: ambientes alcalinos, presencia de agua salada, rayos ultravioletas, temperaturas extremas, elevada humedad y ciclos de hielo deshielo. (440.2R, 2023).

4.1 La Fibra de Carbono Como Refuerzo.

Presentación del material y sistemas de refuerzo

La fibra de carbono se desarrolló inicialmente para la industria espacial o aeronáutica. Sin embargo, la mejora y la reducción del costo de los sistemas de fabricación han permitido su acercamiento a sectores que tradicionalmente demandaban productos de costos sensiblemente menores, como la industria del transporte y en la Ingeniería civil como excelente mecanismo de refuerzo estructural. (Tecnologías Mapei, 2020)

Con ello, y en el caso de las estructuras de edificación y obra civil, se ha logrado la sustitución paulatina

de sistemas de refuerzo tradicionales (recrecidos de secciones de concreto, disposición de platinas y zunchados metálicos, etc.) por otros basados en la puesta en obra de laminados inicialmente de compuestos a base de “FRP” (Ver figura 3). Esto es debido, principalmente, a su sencillez de puesta en obra y a unas características mecánicas (resistencia a tracción y módulo elástico, como más significativas) que garantizan una entrada en carga con deformaciones análogas a las del propio acero de armado, pero con capacidad portante y durabilidad sensiblemente superiores las del metal portante original.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

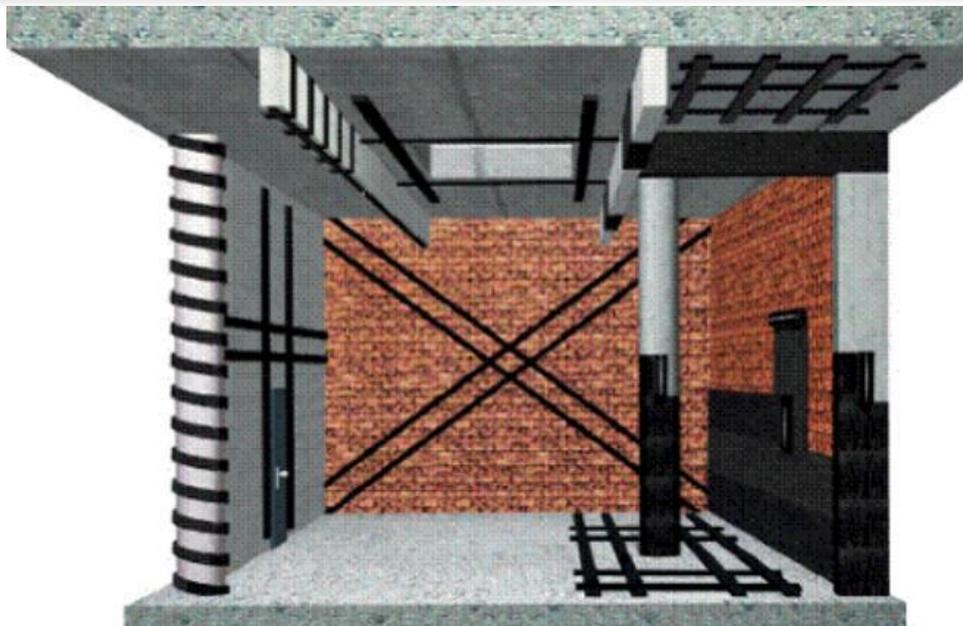


Figura 3. Reforzamiento de elementos de concreto armado con sistemas "FRP". Manual SIKA.

Como punto de partida, se puede considerar el empleo de laminados de fibra de carbono de modo similar al de las barras de acero de la estructura. De esta forma estas actúan como barras longitudinales de acero de las zonas traccionadas, o a los cercos transversales en funciones de zunchado o absorción de paquetes de cortante, siempre teniendo en cuenta que la capacidad de refuerzo de carbono es unidireccional en el sentido de las fibras. Igualmente, conviene tener en cuenta el hecho de que los laminados de fibra de carbono presentan unas características mecánicas muy superiores a las del hormigón y el acero, por lo que

en la mayoría de los casos el éxito del reforzado viene determinado más por el estado y preparación del soporte que por el propio material de refuerzo.

Por ello es posible el aumento de capacidad portante de una estructura ante cortantes, compresiones o flexo-tracciones, mediante las distintas disposiciones del “FRP” de muy alta rigidez, como son los elaborados a base de fibra de carbono. Esto se realiza, como se ha comentado, de un modo análogo a cómo funcionan los armados longitudinales y estribos transversales, pero con la facilidad que supone el hecho

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

de poder efectuar el refuerzo sobre hormigones ya endurecidos, mediante un sistema muy rápido y sencillo, en espesores que rondan el milímetro.

La consecución de dicho compuesto puede ser obtenida de dos formas distintas: mediante proceso industrial, obteniendo un laminado del compuesto con planeidad, homogeneidad y riqueza en carbono totalmente controlada (material pre conformado), o bien recurriendo a la ejecución de laminados “in situ” sobre el propio paramento de la estructura, lo que permite amoldarse a geometrías no rectas (tejidos de fibra), (Machado, 2005). Es por ello que, a fin de cubrir las distintas necesidades del aplicador, se comercialice en ambos formatos, los cuales determinan un distinto sistema de refuerzo.

4.1.1. Materiales

Los FRP son sistemas compuestos por fibras resistentes que funcionan a tracción, y la matriz polimérica de resinas que reparten el esfuerzo entre las fibras y transmiten el mismo al soporte por rasante (Tabla 2).

4.1.1.1 Fibra de Carbono

El elemento resistente de los compuestos FRP son las fibras de carbono basadas en filamentos de alta resistencia mecánica. Según la disposición de estos filamentos y su proceso de fabricación, se podrán encontrar en el mercado en diferentes formatos (ver figura 4)



Figura 4. Imagen de formatos de Fibra de Carbono.

4.1.1.2 Tejidos

Los tejidos de fibra de carbono son agrupaciones de fibras de carbono puras, las cuales pueden estar dispuestas en una sola o dos o más direcciones, formando telas (ver figura 5). Las fibras de carbono unidireccionales se entretrejen con un hilo de fibra de vidrio para el tejido formado pueda manipularse durante su colocación en obra sin que las fibras se separen, mientras que las fibras bidireccionales o multidireccionales can entretrejidas entre sí en direcciones diferentes.

La cantidad de fibra de este formato depende de su peso. La característica principal de tipo de fibra es que los tejidos se deben empapar en la matriz polimérica en la propia obra, y por lo tanto el control de ejecución debe ser muy estricto, pudiendo adaptarse a configuraciones geométricas más o menos complejas.

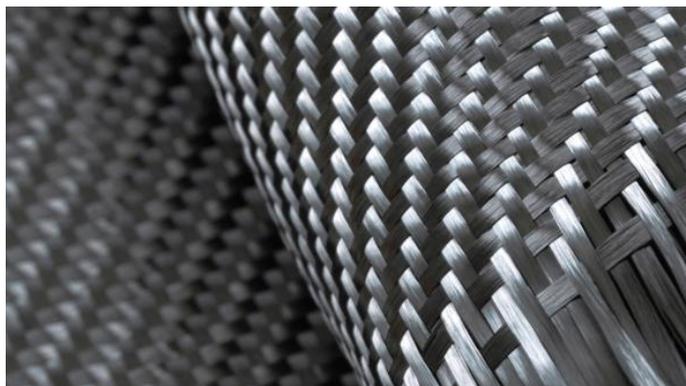


Figura 5. Imagen de la fibra en forma de tejido.

4.1.1.3 Barras

Las barras de carbono son filamentos unidireccionales de carbono embebidos en una matriz polimérica en forma de barra de diámetro controlado. Por tratarse de un compuesto fabricado en la industria por producción, el contenido de fibras es constante u su aplicación dentro de la matriz es perfectamente lineal.

La característica principal de este tipo de fibra es su configuración en forma de barra (Ver figura 6), lo que permite a la barra de fibras de carbono trabajar a tracción de un modo análogo a las barras de acero,

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

trabajando embebidas dentro de la estructura en vez de adheridas por el exterior.



Figura 6. Barras de fibra de carbono.

4.1.1.4 Laminados

Los laminados de fibra de carbono son filamentos unidireccionales o multidireccionales de carbono embebidos en una matriz polimérica, que mantiene la posición relativa de las fibras y su orientación, tomando forma de láminas de dimensiones calibradas. Por tratarse de un compuesto fabricado en factoría de producción, su contenido en fibras es constante y su disposición geométrica dentro de la matriz es perfectamente lineal (*Ver figura 7*). Los laminados pueden ser lineales, o tomar formas especiales, como angulares, normalmente en ángulo recto, facilitando la posibilidad de refuerzo a cortante.



Figura 7. Imagen de láminas de fibra de carbono instaladas a flexión en vigas.

4.1.1.5 Mechas

Son elementos contruidos con fibra de carbono cuya función es la de establecer un anclaje por empotramiento al soporte de los tejidos y laminados, empleados habitualmente para reforzar secciones a flexión o cortante, siendo especialmente útiles para garantizar la transmisión de esfuerzos desde la estructura al refuerzo cuando no existe espacio físico para realizar el anclaje de un tejido o un laminado por prolongación recta, o cuando no es posible envolver completamente la sección estructural para su refuerzo a cortante o por confinamiento.

Existen varios tipos:

—Conectores preformados que poseen un vástago rígido para empotrar en el soporte (de diferentes diámetros) y uno o dos extremos flexibles para realizar el solape con el refuerzo a anclar. Su colocación se realiza practicando un taladro en el soporte, limpiando con aire comprimido la perforación, encolando el conector con resina epóxica tixotrópica e introduciendo el vástago en la perforación y distribuyendo uniformemente los filamentos flexibles sobre la superficie del elemento a anclar describiendo una forma de «pétalos de flor» como se puede observar en la figura 8.



Figura 8. Imagen del "FRP" en forma de mechass.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

- Fibras sueltas de carbono, contenidas en una reddecilla que les da forma de cuerda o mecha. Existen de varios diámetros. Se usan endureciendo un extremo, previamente a su empotramiento en el soporte, mediante inmersión en resina epóxica fluida. El empotramiento en el soporte y el solapamiento con el refuerzo se efectúan con adhesivo epóxico de consistencia semifluida o pastosa, mediante inyección en el empotramiento y espátulado en el solape. (Sistach, 2021)

<i>TIPOLOGIA</i>	<i>USO</i>	<i>COLOCACION</i>	<i>ELEMENTOS A REFORZAR</i>
<i>LAMINADOS</i>	<i>Refuerzo a Flexión</i>	<i>Adherido/Embebido</i>	<i>Lineales</i>
	<i>Refuerzo a Cortante</i>	<i>Adherido</i>	<i>Lineales</i>
<i>TEJIDOS</i>	<i>Refuerzo a Flexión</i>	<i>Adherido</i>	<i>No Lineales</i>
	<i>Refuerzo a Cortante</i>	<i>Adherido</i>	<i>Vigas, Muros, Ménsulas</i>
	<i>Confinamiento</i>	<i>Adherido</i>	<i>Pilas, Silos, Muros</i>
<i>BARRAS</i>	<i>Refuerzo a Flexión</i>	<i>Embebido</i>	<i>Lineales</i>
	<i>Refuerzo a cortante</i>	<i>Embebido</i>	<i>Lineales</i>
<i>MECHAS</i>	<i>Refuerzo por Tracción</i>	<i>Embebido/Adherido</i>	<i>Lineales</i>

Tabla 2. Tipos y usos de Fibra de Carbono en diferentes elementos estructurales.

4.1.1.6 Resinas

Las resinas son parte fundamental de los sistemas, ya que estas son las que se encargan de transmitir los esfuerzos de la pieza a reforzar al compuesto de fibra de carbono y viceversa, por lo que deben estar diseñadas para conseguir una buena adherencia sobre el hormigón y el compuesto FRP, y por su forma de trabajo, poseer una buena resistencia a cortante sin fluencia. Se tratan de resinas en base epoxi sin disolventes, tixotrópicas y 100% solidas, a fin de asegurar un endurecimiento óptimo sin mermas o retracciones.

En la *tabla 3* se especifican los tipos de resinas que se utilizan para la colocación de diferentes clases de Fibra de Carbono.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

TIPO DE RESINA	USO	FUNCION	CARACTERISTICA
Resina de Imprimación	<i>Todos los sistemas</i>	<i>Penetra en el poro del concreto, consolidando y mejorando la adherencia del sistema a disponer encima.</i>	<i>Resinas Fluidas</i>
Resina de Impregnación	<i>Sistemas de Fibras y Tejidos</i>	<i>Se adhiere a la imprimación y embebe las fibras, conformando el sistema</i>	<i>Resinas de Viscosidad media</i>
Resina de Adhesión	<i>Sistemas de Barras y laminados</i>	<i>Adhiere los laminados y/o barras al soporte a reforzar</i>	<i>Resinas de Alta Viscosidad</i>

Tabla 3. Tipos de Resinas y usos.

4.2 Filosofía de los Diseños de Refuerzo con Fibras de Carbono

Los compuestos de polímero reforzado con fibra de carbono se utilizan actualmente para reforzar o mejorar la capacidad de carga de una amplia gama de estructuras, ya sea en concreto armado u otro material, los cuales deben ofrecer ventajas técnicas y económicas para tener éxito en el mercado de la construcción. Si bien los compuestos de FRP se vienen utilizando cada vez más en combinación con otros materiales de construcción para la rehabilitación de estructuras existentes, aun no existen códigos y normas para la evaluación del estado estructural y la rehabilitación de las estructuras. La información de diseño para la mayoría de los materiales compuestos de FRP ha sido desarrollada principalmente por la industria de los compuestos.

Debido a los beneficios técnicos y económicos que se logran con el uso de sistemas reforzados con fibra FRP adheridos externamente para la reparación y el fortalecimiento de estructuras de concreto armado, este método de rehabilitación de estructuras se ha convertido en una práctica aceptada en muchos países. Estos sistemas FRP son livianos, presentan una alta resistencia a la tracción y son fáciles de instalar, estas características facilitan el manejo y ayudan acelerar la reparación o la construcción, mejorando el rendimiento a largo plazo y dando como resultado ahorros en los costos.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

La norma ACI PRC 440.2-23 en su ítem 8.1 trata de la filosofía empleada en refuerzo de las estructuras de concreto armado con compuestos estructurados con “FRP”.

Las recomendaciones de diseño están basadas en los principios de los cálculos en el estado límite último. El concepto como se aborda este tema, permite llevar a niveles aceptables de seguridad contra la ocurrencia, tanto del límite de aprovechamiento (utilización) de las estructuras, tales como control de deformaciones excesivas y fisuración, como de las solicitaciones en el estado límite último, tales como el colapso estructural, ruptura por tensiones excesivas y fatiga.

Al evaluarse la resistencia nominal del elemento deberán medirse los posibles modos de colapso estructural y las subsecuentes tensiones y deformaciones en cada material constructivo. Para la determinación de las condiciones de utilización del elemento, pueden y deben ser utilizados parámetros de ingeniería tales como relaciones modulares y secciones transformadas. (440.2R, 2023)

En el caso de la utilización de los refuerzos con “FRP”, buscando prevenir acciones sísmicas en las estructuras, es recomendable la utilización de procedimientos que tengan consideración los principios de evaluación de la capacidad resistente máxima de las mismas. En este caso es recomendable admitir que la estructura debe utilizar toda su capacidad resistente y en función de eso, exigir que la resistencia al esfuerzo cortante de sus elementos constituyentes, este adecuada a ese nivel de solicitación.

Aunque se ha descrito ampliamente la Fibra de Carbono, conviene completar la filosofía de esta, con los aspectos estrictamente relacionados con la “resistencia de los materiales”. El Diagrama tensión/deformación del conjunto de concreto armado y la CFR es suficientemente elocuente (*Imagen 9*). El módulo elástico del concreto (según su calidad) es entre 6 y 10 veces inferior al del acero. Sin embargo, los módulos elásticos del acero y de la fibra de carbono son muy similares. En el caso de la Fibra de carbono, depende de si se trata de tejidos o laminados. Pero lo que si difiere es el límite elástico y de rotura

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

de cada uno de los materiales. El concreto a tracción fisura para una deformación del 1% y prácticamente no tiene comportamiento plástico significativo. El acero, según su calidad, puede tener un límite elástico entre 400 y 500 N/mm² para una deformación del 2% y un comportamiento plástico hasta una deformación del 10%. El acero plastificado siempre tendrá una deformación del 2%. La fibra de carbono puede llegar a tener un límite elástico de hasta más de 3000N/mm² que coincide con el límite de rotura, prácticamente.



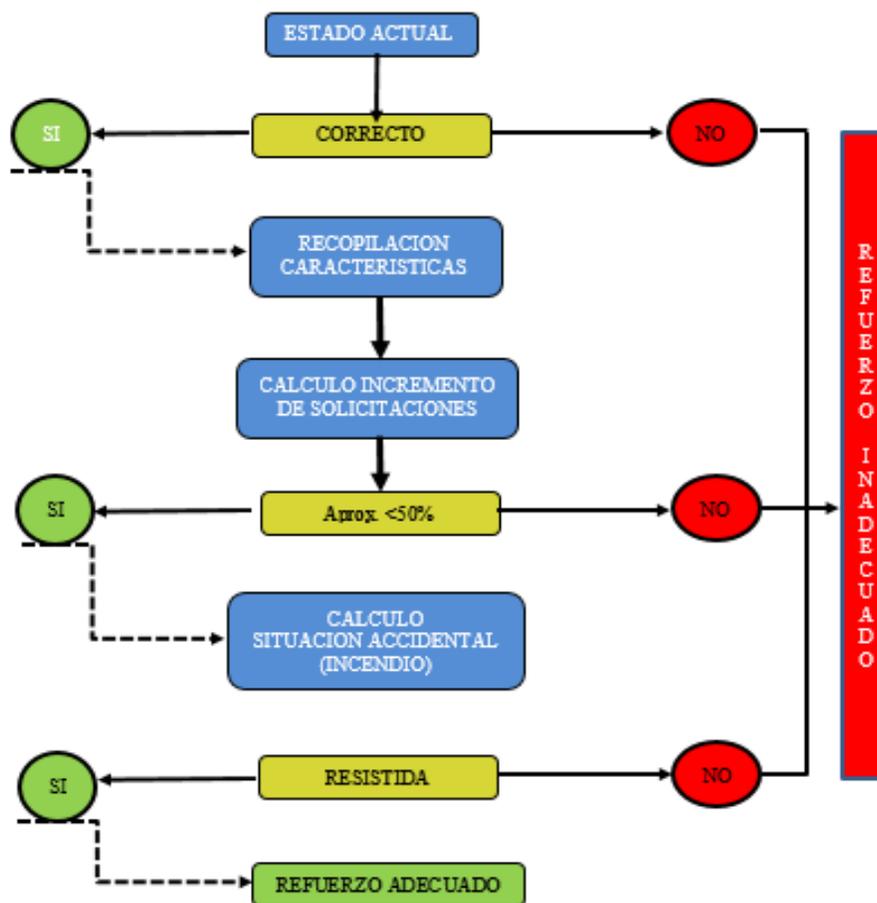
Figura 9. Diagrama tensión/deformación del concreto-acero-FRP.

Como se ha indicado, el éxito de los sistemas de refuerzo FRP depende en gran medida de la calidad de los materiales y su comportamiento entre sí. Como refuerzos, serán aplicados por personal calificado y siguiendo las directrices del fabricante de los componentes del sistema, a fin de asegurar el perfecto funcionamiento del mismo. En ningún caso se deberán usar fibras y resinas de diferentes fabricantes dentro del mismo refuerzo.

Así pues, aceptada la bondad del material FRP, hay que reconocer que su aplicación al refuerzo de elementos de concreto armado no agota ni mucho menos sus posibilidades. Dicho eso, a continuación, se

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

describe la aplicación como refuerzo a flexión, cortante y confinamiento.



5. Ejemplo de aplicación para un caso de estudio

5.1 Descripción caso de estudio

Se presentará la inspección, patología y evaluación de capacidad estructural del puente vehicular existente ubicado en la vía que comunica los municipios de Don Matías y Santa Rosa de Osos en el departamento de Antioquia. En el informe se presenta un registro fotográfico de la inspección realizada donde se pondrán en evidencia los hallazgos encontrados en la estructura. Se presentará un análisis de los

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

ensayos destructivos y no destructivos realizados y un análisis de capacidad estructural teniendo en cuenta los resultados de los ensayos y la determinación de cuantías de refuerzo con la realización de regatas en los sitios de interés. Finalmente se recomendarán las reparaciones o intervenciones propuestas para la estructura con base a los hechos evidenciados en la misma.

El puente es de una luz de aproximadamente 23.00m de longitud y ancho aproximado de 9.17m, se tiene un tablero compuesto por una losa y 4 vigas de concreto reforzado, arriostradas en el centro de la luz por elementos diagonales de 0.45m de ancho y 0.60m de alto, las vigas se apoyan sobre estribos con un vástago de aproximadamente 5.90m de altura.



Figura 10. Imagen Puente Rio Grande entre los municipios de Don Matías y Santa Rosa de Osos.

El puente consta de una luz de vigas reforzadas, la sección transversal de la súper estructura del puente tiene un ancho de 9.17m. Tiene una losa reforzada con 0.19m de espesor. Consta de 4 vigas reforzadas rectangulares de 0.45m de ancho, 0.65m de altura, 23.0m de longitud y espaciadas cada 2.30m. Los bordillos existentes tienen una altura de 0.32m, en los cuales se ancla una baranda metálica. La geometría de la sección trasversal se muestra en la *figura 11*. La sección de los rigidizadores es rectangular con un

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

ancho de 0.45m y una altura de 0.60m.

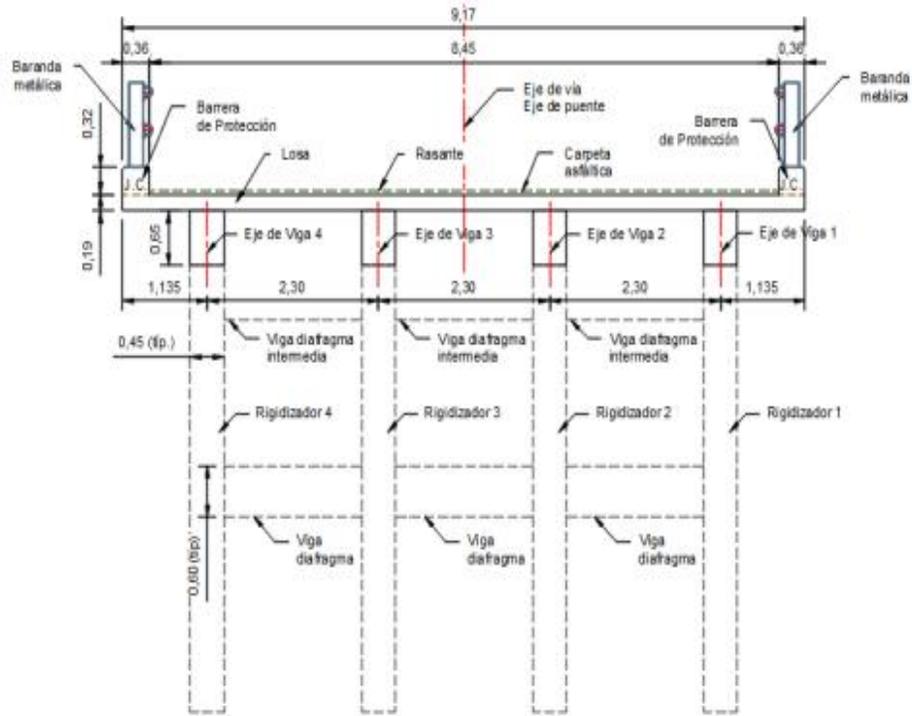


Figura 11. Geometría sección Transversal.



Figura 12. Imagen de vigas, losa y riostras del puente Rio Grande.

5.2 Ensayos de campo

Se realizaron los siguientes ensayos con el fin de verificar y determinar el estado de los elementos de concreto y el estado del acero de refuerzo.

Esclerómetro: con el fin de realizar una estimación de la resistencia del concreto de los elementos y la homogeneidad.

Escáner: localización del refuerzo y estimación del diámetro de la barra.

Regatas: exposición del refuerzo con el fin de determinar la distribución y cuantía del refuerzo en cada elemento.

Extracción de núcleos: con el fin de realizar una validación de la resistencia del concreto de los elementos

Ensayo de Fenolftaleína: Determinar grado de acidez o alcalinidad del concreto a través de su Ph.

Se ejecutaron un total de:

- 8 extracciones de núcleos de concreto con su respectivo sello.
- 6 ensayos de regatas para validación de acero.
- 8 ensayos con fenolftaleína para determinar profundidad de carbonatación en los núcleos de concreto.
- 4 Ensayos con esclerómetro.

5.2.1 Núcleos

Normas aplicadas:

- NTC 3658-1994 - Método para la obtención y ensayo de núcleos extraídos y vigas de concreto aserradas
- NTC 504-1995 – Refrendado de especímenes cilíndricos de concreto.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Se realizaron 8 extracciones de núcleos de concreto, en diferentes partes del puente para obtener la resistencia a la compresión de los cilindros y realizar ensayos de carbonatación sobre los mismos. En la *figura 13* se muestra uno de los núcleos extraídos.



Figura 13. Imagen núcleo extraído para el ensayo de compresión del concreto.

Los resultados de las resistencias alcanzadas en los cilindros se presentan en la *tabla 4*.

Núcleo	Elemento	Resistencia compresión (kg/cm ²)	
5	Viga 2	466.1	351.1
6	Viga 3	236.1	
3	Losa costado eje 1	352.8	359.8
4	Losa costado eje 2	366.7	
1	Estribo eje 1	273.5	262.0
8	Estribo eje 2	250.5	
2	Rigidizador eje 1	437.4	353.7
7	Rigidizador eje 2	269.9	

Tabla 4. Resistencia a la Compresión de núcleos extraídos.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Las resistencias alcanzadas por los cilindros se consideran aceptables y representan una buena condición de la estructura y se emplearan para las verificaciones de capacidad.

5.2.2 Ensayo de Fenolftaleína.

A los cilindros se les aplicó fenolftaleína para revelar el nivel de PH y registrar el nivel de carbonatación. La fenolftaleína es un químico reactivo que determina el nivel de alcalinidad o acidez de la muestra, variando las tonalidades desde violeta (alcalino) y sin color (ácido).

Un nivel de PH en el concreto menor a 9.0 puede afectar directamente el acero de refuerzo ocasionando corrosión en el acero. Las pruebas de carbonatación se realizaron en todos los cilindros y se muestran en la *figura 14*.



Figura 14. Imagen del ensayo de fenolftaleína aplicado a los cilindros de concreto.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Los núcleos extraídos y fallados fueron impregnados con fenolftaleína al 1% en el total de su longitud y la evidencia de los resultados se presentó en la *figura 14*. Para los núcleos evaluados se determinó que los núcleos 2 (Rigidizadores eje 1) y 7 (Rigidizadores eje 2) tienen una profundidad de carbonatación de 3.95cm y 0.69cm respectivamente. Para el resto de muestras por el color violeta que tomaron se determina que no se presenta profundidad de carbonatación, por lo que se determina que el estado del concreto es adecuado.

5.2.3 Ensayo de Esclerómetro

El ensayo con esclerómetro es un ensayo no destructivo que consiste en utilizar un instrumento para golpear con un martillo la estructura de concreto y medir su rebote, para con ayuda de correlaciones estimar la resistencia a la compresión.

Se realizaron ensayos de esclerómetro en el estribo del eje 1, rigidizador 1, rigidizador 2, rigidizador 3. En la *tabla 5* se presentan los resultados obtenidos.



Figura 15. Imagen ensayo de Esclerometría en losa, vigas y riostras.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Elemento	Lectura	Correccion por el Instrumento	F`c (Mpa)
Estribo eje 1 Borde Izquierdo	52	64	58,93
	44	50	
	54	68	
	52	66	
	44	50	
	54	68	
	52	66	
	50	62	
	52	66	
	46	54	
	46	54	
	46	54	
	48	58	
	44	50	
46	54		
Elemento	Lectura	Correccion por el Instrumento	F`c (Mpa)
Rigidizador 1	50	62	62,53
	50	62	
	52	64	
	50	62	
	50	62	
	52	64	
	50	62	
	48	58	
	50	62	
	54	68	
	48	58	
	52	64	
	50	62	
	48	58	
56	70		

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Elemento	Lectura	Correccion por el Instrumento	F`c (Mpa)
Estribo eje 1 Borde derecho	58	70	65,73
	56	70	
	54	68	
	56	70	
	48	58	
	56	70	
	54	68	
	52	64	
	52	64	
	50	62	
	54	68	
	52	64	
	54	68	
	52	64	
48	58		
Elemento	Lectura	Correccion por el Instrumento	F`c (Mpa)
Rigidizador 3	44	50	52,53
	44	50	
	46	54	
	44	50	
	48	58	
	44	50	
	40	42	
	50	62	
	44	50	
	40	42	
	52	64	
	46	54	
	42	46	
	50	62	
46	54		

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Elemento	Lectura	Correccion por el Instrumento	F`c (Mpa)
Rigidizador 2	42	46	59,09
	44	50	
	44	50	
	50	62	
	52	64	
	52	64	
	50	62	
	52	64	
	50	62	
	48	58	
	50	62	
	56	70	
	44	50	
	52	64	
	48	58	

Tabla 5. Resultados del ensayo con el Esclerómetro.

Como se nota en la tabla anterior, los resultados obtenidos son satisfactorios, representan un concreto con buenas características y con homogeneidad entre sus medidas.

5.2.4 Ensayo de escáner y regatas

Inicialmente se hizo un escaneo sobre los elementos para determinar el espaciamiento de las barras de refuerzo y tener una aproximación del diámetro de la barra luego se realizó el ensayo de regata el cual consiste en retirar el recubrimiento del concreto hasta poder observar el refuerzo, verificar el estado, diámetro y espaciamiento entre barras. Se tuvo precaución de no afectar el refuerzo existente con los resultados obtenidos con el escáner.

En la *tabla 6* se especifican los elementos estructurales a los cuales se les realizaron regatas.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Regata	Elemento
2	Losa cara superior
7	Losa cara inferior
5-5.1	Viga longitudinal (tercio medio)
3-4	Viga longitudinal (Cerca al estribo)
1	Rigidizador (Hacia Don Matías)
6	Rigidizador 3 (Hacia Santa rosa)

Tabla 6. Regatas.

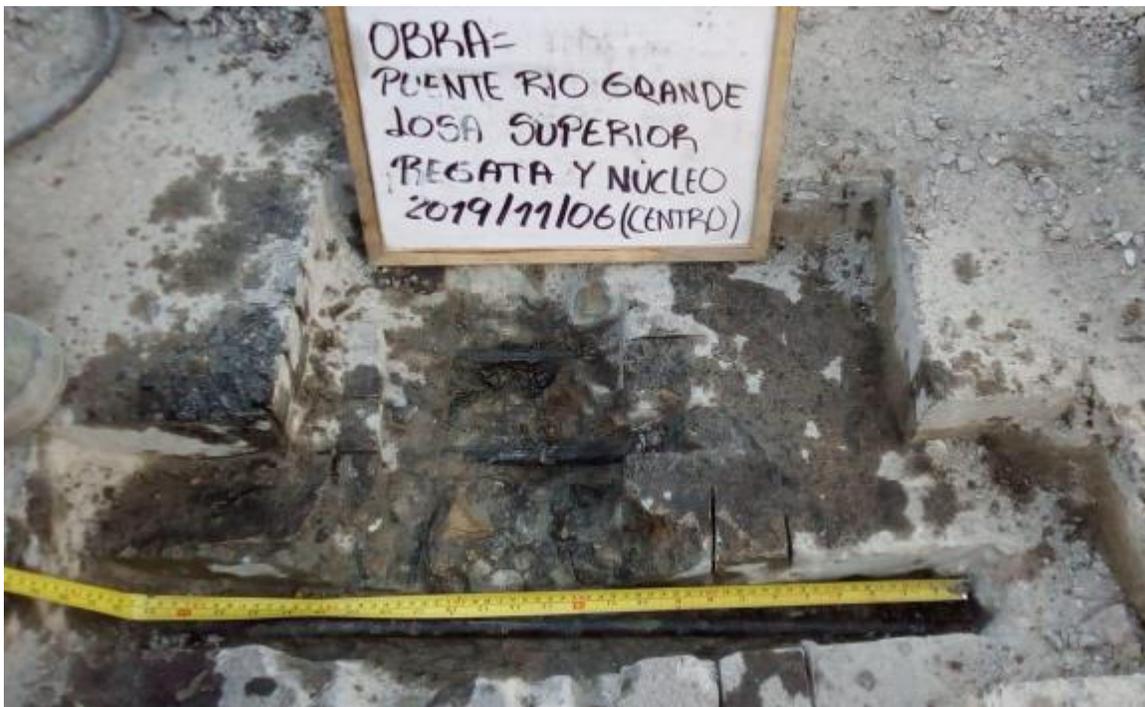


Figura 16. Imagen regata losa superior.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado



Figura 17. Imagen regata 3. Viga reforzada 2.

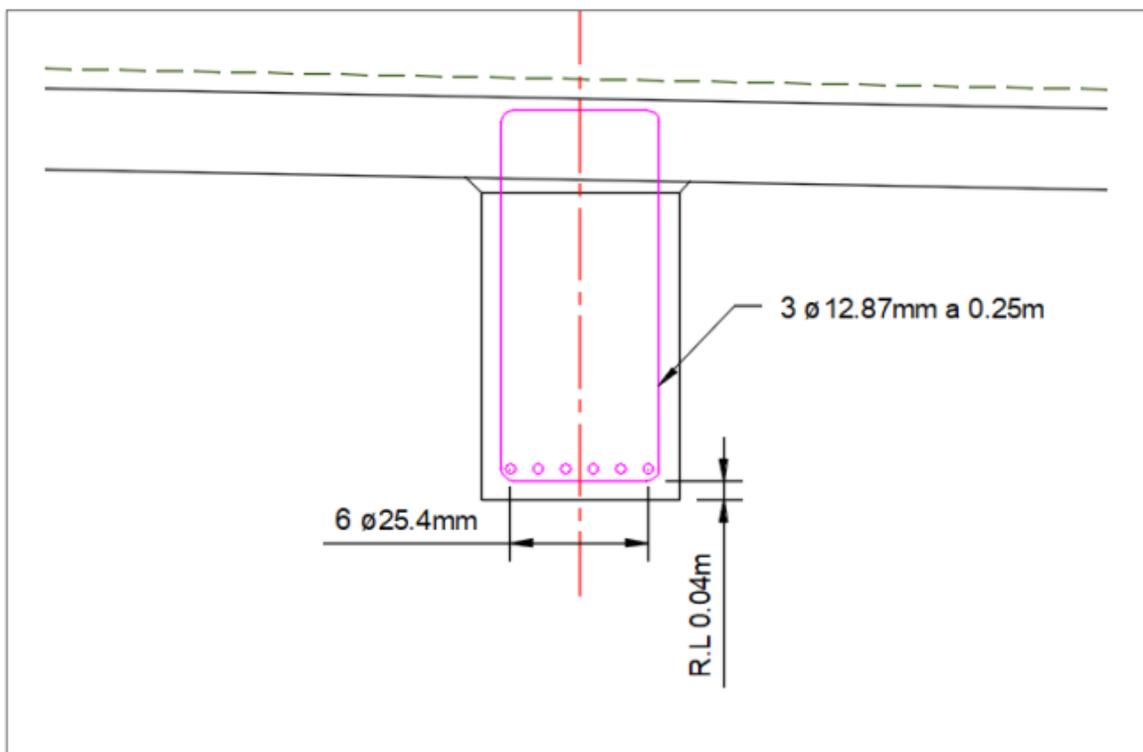


Figura 18. Esquema del refuerzo regata viga reforzada 2.

6. Evaluación de capacidad

Se realizará la evaluación de capacidad de la estructural, actualizando las solicitaciones de acuerdo con la norma Colombiana de Diseño de Puentes de 2014 (CCP-14). Para los análisis de capacidad se utilizarán las resistencias a la compresión obtenidas al fallar los cilindros de concreto, por ser un ensayo destructivo, directo al material, por lo que se consideran fiables sus resultados y se empleara el acero de refuerzo encontrado en las regatas para las verificaciones.

6.1 Software utilizado

- SAP2000, para la modelación de la estructura, verificación de su comportamiento y cálculo de solicitaciones.
- Microsoft Excel, como herramienta general de cálculo en el diseño estructural.

6.2 Análisis de cargas

6.2.1 Peso Específico

Para el análisis de cargas muertas se utilizaron los siguientes pesos específicos:

- Concreto reforzado: 2.40 t/m³
- Acero de refuerzo: 7.85 t/m³
- Asfalto: 2.30 t/m³

6.2.2 Carga viva

- Vehículo:

La carga viva vehicular para el análisis será la establecida en el artículo 3.6.1.2 del CC-14, la cual es designada como CC-14.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

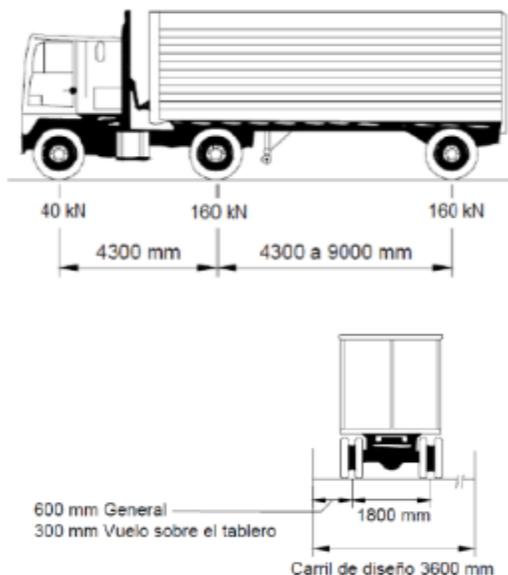


Figura 19. Vehículo C36-14.

6.3 Análisis estructural

Para realizar el análisis estructural de la estructura se realizó un modelo matemático de la estructura donde se representó el tablero (vigas y losa) como un elemento tipo frame simplemente apoyado en los estribos. Los rigidizadores se modelador de manera individual como un elemento tipo frame. En la *figura 20* se muestra el modelo estructural del puente.

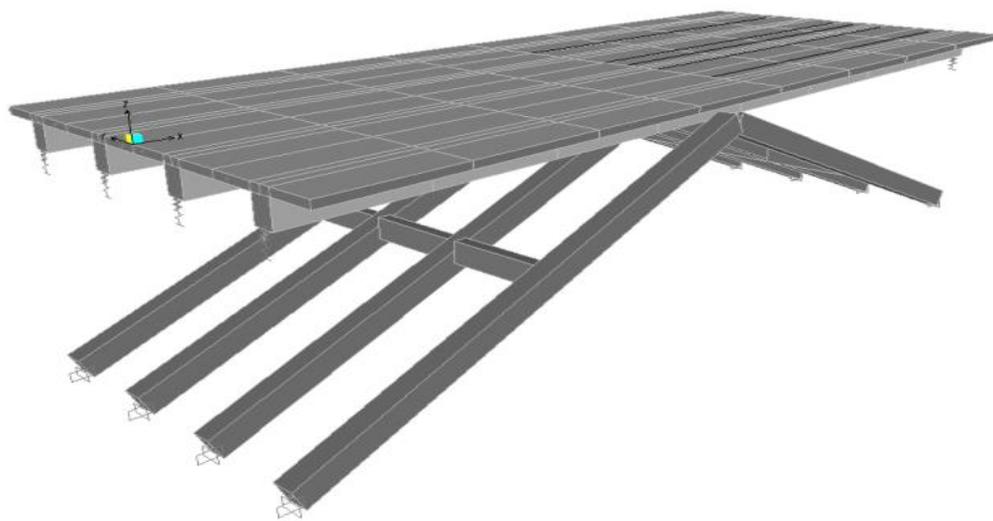


Figura 20. Modelo Estructural.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

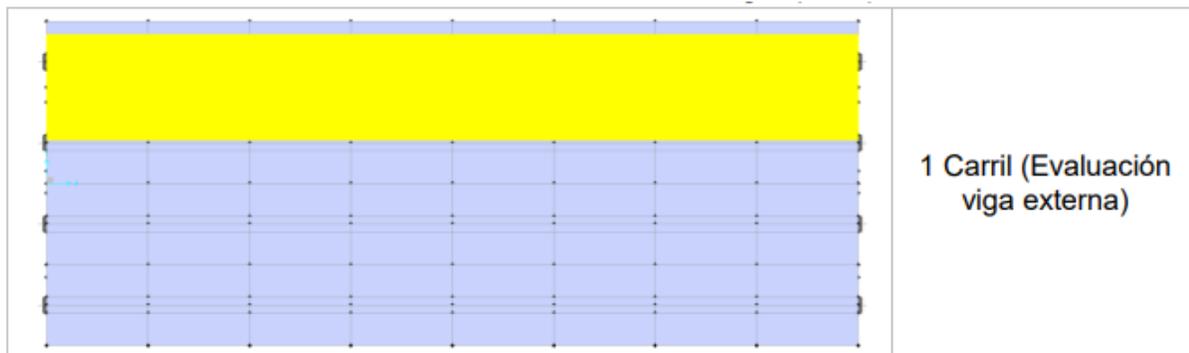
Las sobre cargas aplicadas en la súper estructura se presenta en la *tabla 7*.

Sobre Carga				
Elemento	Ton/m	Tipo	Total (Ton/m)	Total (Ton/m ²)
Pavimento	1.36	DW	1.56	0.17
Instalaciones	0.10			
Pasamanos	0.10			
Anden -Barrea de protección	0.55	DC	0.55	0.06

Tabla 7. Sobre carga por metro lineal. (Ton/m).

6.4. Vigas reforzadas

Para la evaluación de carga viva en las vigas principales se ubicaron los carriles de diseño en el modelo matemático tomando las posiciones más desfavorables para evaluar las solicitaciones en vigas externas e internas. En la *figura 21* se muestra la ubicación de los carriles evaluados.



Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

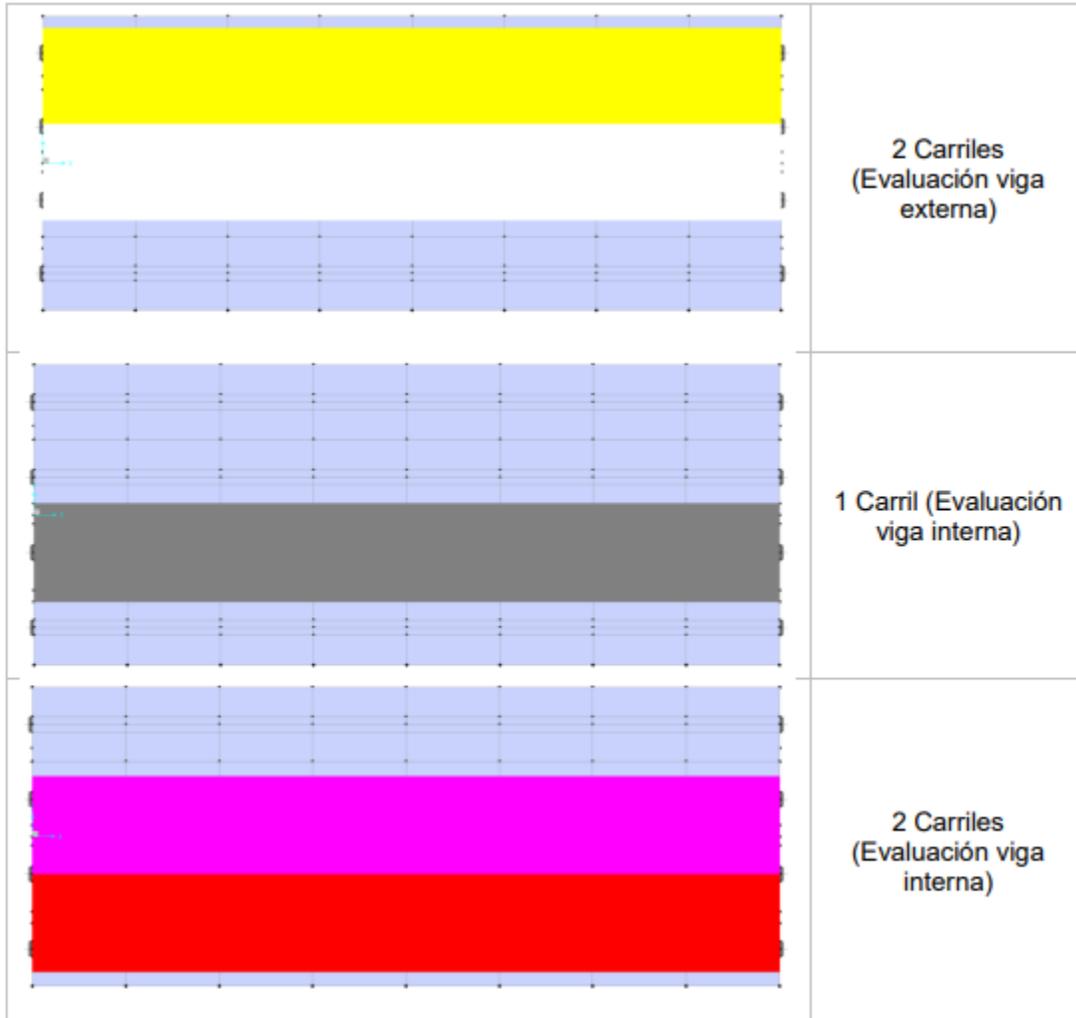


Figura 21. Carriles de diseño. Vigas principales.

6.5.1 Solicitaciones Últimas

Las solicitaciones últimas se evalúan en el modelo matemático, en *las figuras 22 y 23* se muestran los diagramas de momentos y cortante.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

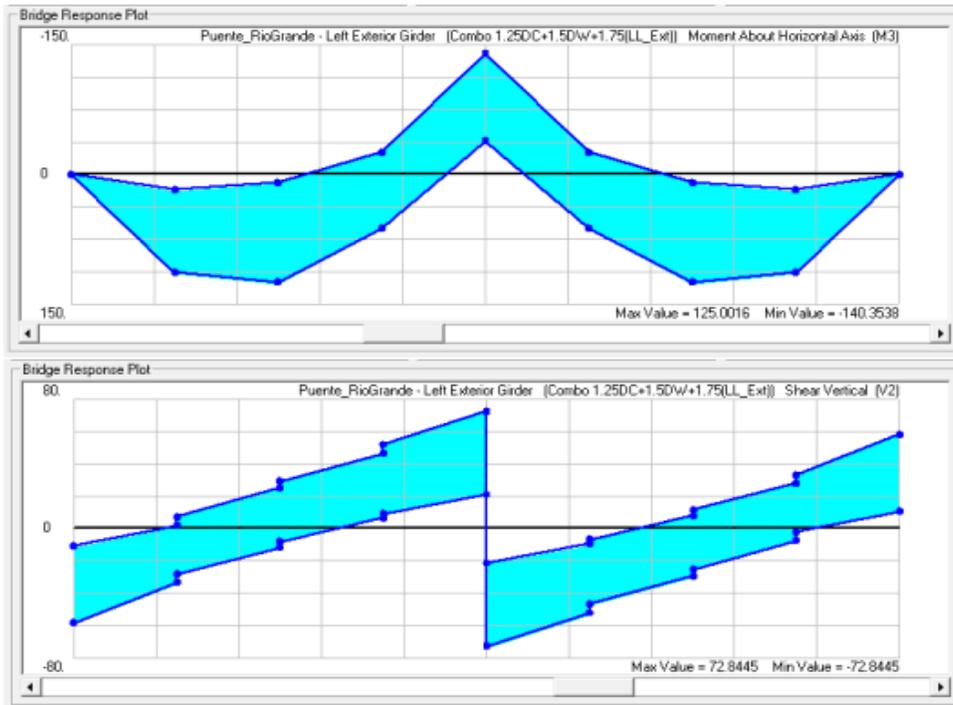


Figura 22. Envoltente de solicitaciones Viga Exterior.

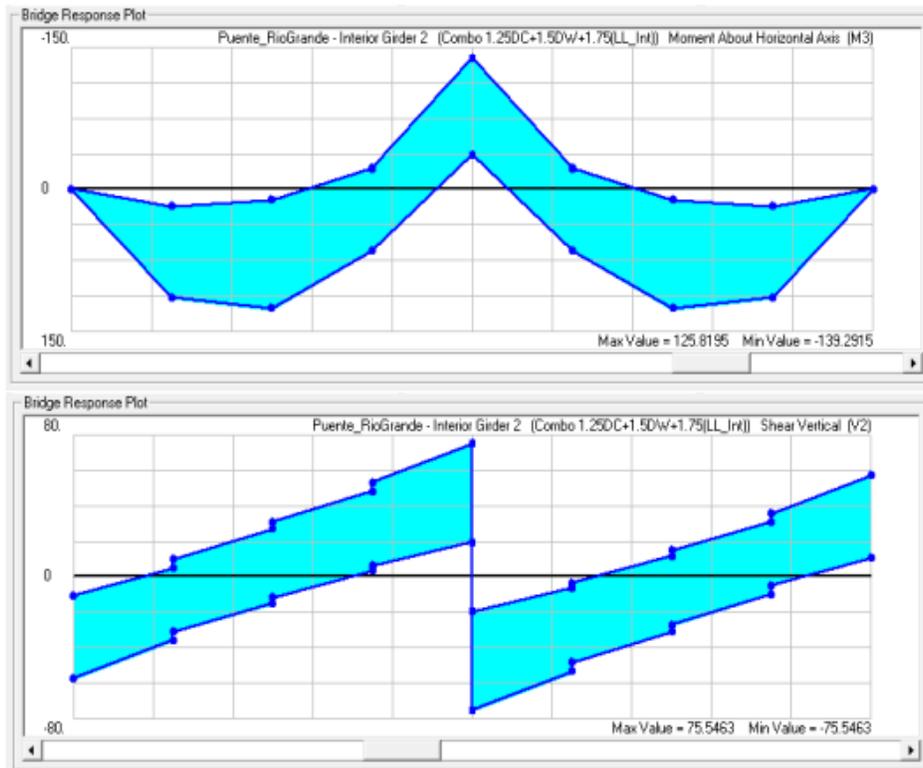


Figura 23. Envoltente de solicitaciones Vigas Interiores.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

En la *tabla 8* se presenta tabulado las solicitaciones ultimas de diseño por viga.

Resistencia I: 1.25DC + 1.5DW + 1.75LL			
Momento por viga		Cortante a "d" por Viga	
M(+) Viga Interna (Ton.m)	125.82	V estribo Viga Interna (Ton)	51.66
M(+) Viga Externa (Ton.m)	125.00	V estribo Viga Externa (Ton)	51.81
M(-) Viga Interna (Ton.m)	-139.30	V Centro Viga Interna (Ton)	69.75
M(-) Viga Externa (Ton.m)	-140.35	V Centro Viga Externa (Ton)	67.4

Tabla 8. Solicitaciones Ultimas

6.5.2 Capacidad Estructural

Para mostrar los resultados en cuanto al desempeño estructural de las vigas se elaboran las *tablas 9 y 10*, comparativas entre los momentos y cortantes últimos actuantes y los momentos y cortantes que los modelos están en capacidad de resistir, así como tablas que comparen la Demanda – Capacidad del elemento.

Tabla 9. Momento Resistente Positivo Vigas.

CHEQUEO MOMENTO RESISTENTE VIGA T			
h(m)	0.65	Altura de la Viga	
b(m)	0.45	Ancho de la Viga	
t(m)	0.19	Espesor de la losa	
L(m)	23	Longitud de la viga	
S(m)	2.3	Aferencia	
B _{efectivo}	2.3	Ancho efectivo del Patín	
F _c (kgf/cm ²)	355	Resistencia a Compresión de la viga	
F _y (kgf/cm ²)	4200	Esfuerzo de Fluencia del Acero	
E (kgf/cm ²)	2000000	Módulo de Elasticidad del Acero	
Acero zona a Compresión (A's)			
#Barra	4	Cantidad de barras	16.3
#Barra	8	Cantidad de barras	7.2
A's/m (cm ²)	57.87	Acero dispuesto en la zona a compresión	
r _s (m)=d'	0.100	Recubrimiento cara compresión	
Acero zona a Tracción (As)			
#Barra	8	Cantidad de barras	6
#Barra	0	Cantidad de barras	0
As/m (cm ²)	30.6	Acero dispuesto en la zona a Tracción	
r _s (m)=d'	0.100	Recubrimiento cara a Tracción	

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

d (m)	0.77	Longitud efectiva acero a Tracción
-------	------	------------------------------------

ϵ_c	0.003	Deformación unitaria del concreto
ϵ_y	0.0021	Deformación unitaria del acero a fluencia
β_1	0.80	Factor de reducción

Condición 3. El acero a compresión No ha fluido		
a	55319.2	Coefficiente de X^2
b	218716.216	Coefficiente de X
c	-3472362.2	Constante
a (m)	4.93	Altura bloque de Compresión Whitney
C (m)	6.19	Distancia a eje neutro

Acero Superior: A Tracción		
ϵ'_s	0.00185	Deformación unitaria acero superior
F'_s (kgf/cm ²)	3694.97	Esfuerzo acero a compresión
ϵ_s	0.0345	Deformación unitaria del acero inferior
Φ	0.9	Factor de resistencia

T (Ton.f)	128.52	Fuerza de Tensión
C (Ton.f)	342.36	Fuerza a Compresión del Concreto
C's (Ton.f)	213.84	Fuerza del acero superior
Y (cm)	35.32	Distancia fuerza a tracción a fibra Sup.

Mr (Ton.m)	101.25	Momento resistente de la sección
------------	--------	----------------------------------

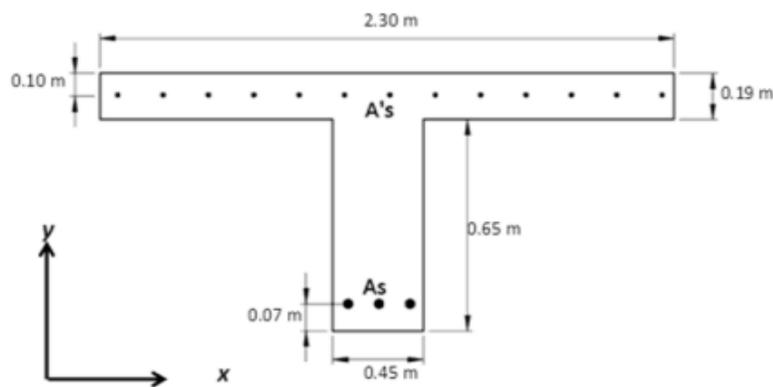


Figura 24. Sección Viga “T”.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

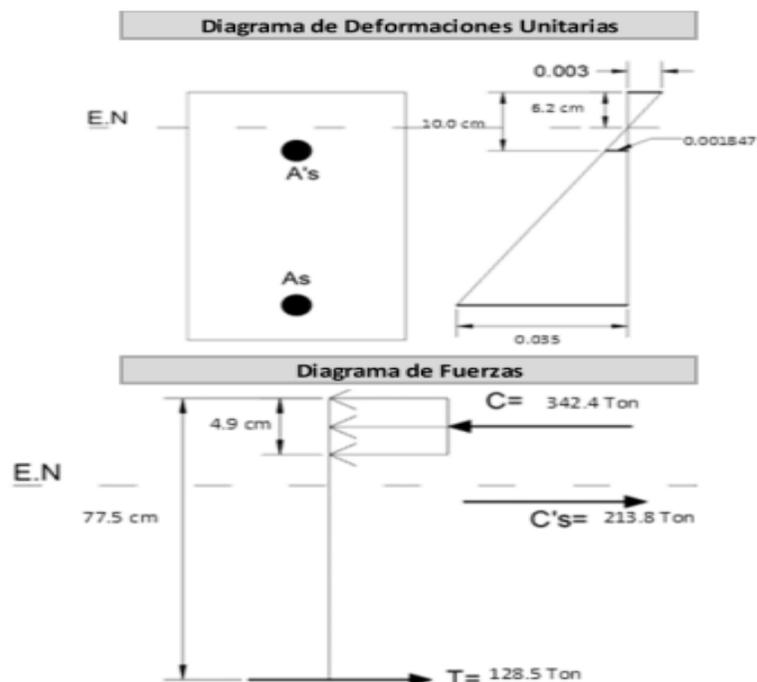


Figura 25. Diagrama de deformaciones Unitarias y Diagrama de Fuerzas Momento resistente positivo.

Se calcula el momento resistente negativo, por encontrarse la zona de Compresión de la viga en la parte inferior, se analizará como una viga rectangular.

Tabla 10. Momento Resistente Negativo Vigas.

CHEQUEO MOMENTO RESISTENTE VIGA RECTANGULAR			
h(m)	0.84	Altura de la Viga	
b(m)	0.45	Ancho de la Viga	
F`c (kgf/cm ²)	355.425	Resistencia a Compresión de la viga	
Fy (kgf/cm ²)	4200	Esfuerzo de Fluencia del Acero	
E (kgf/cm ²)	2000000	Módulo de Elasticidad del Acero	
Acero zona a Compresión (A`s)			
#Barra	4	Cantidad de barras	6
#Barra	0	Cantidad de barras	0
A`s/m (cm ²)	30.6	Acero dispuesto en la zona a compresión	
r _s (m)=d`	0.070	Recubrimiento cara compresión	
Acero zona a Tracción (As)			

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

#Barra	4	Cantidad de barras	16.33
#Barra	8	Cantidad de barras	7.22
As/m (cm ²)	57.9	Acero dispuesto en la zona a Tracción	
r _s (m)=d'	0.100	Recubrimiento cara a Tracción	
d (m)	0.77	Longitud efectiva acero a Tracción	

ε _c	0.003	Deformación unitaria del concreto
ε _y	0.0021	Deformación unitaria del acero a fluencia
β ₁	0.80	Factor de reducción de resistencia de la compresión

Condición 3. El acero a compresión No ha fluido		
a	10823.2	Coefficiente de X ²
b	-60622.805	Coefficiente de X
c	-1200744.0	Constante
a (m)	10.91	Altura bloque de Compresión Whitney
C (m)	13.7	Distancia a eje neutro

Acero Superior: A Tracción		
ε' _s	0.00157	Deformación unitaria acero superior
F' _s (kgf/cm ²)	3135.65	Esfuerzo acero a compresión
ε _s	0.0132	Deformación unitaria del acero inferior
Φ	0.9	Factor de resistencia

T (Ton.f)	244.22281	Fuerza de Tensión
C (Ton.f)	148.27	Fuerza a Compresión del Concreto
C's (Ton.f)	95.95	Fuerza del acero superior
Y (cm)	5.88	Distancia fuerza a tracción a fibra Sup.

Mr (Ton.m)	149.73	Momento resistente de la sección
------------	--------	----------------------------------

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

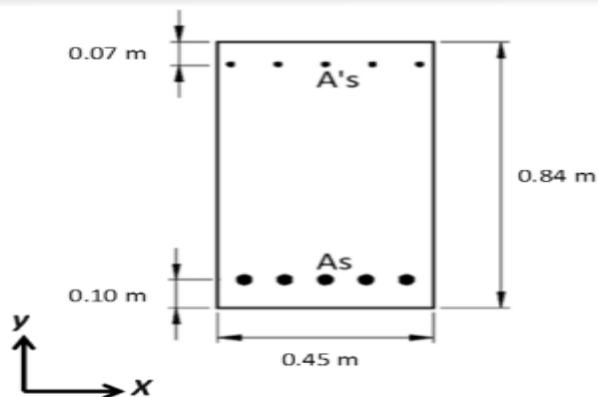


Figura 26. Viga Rectangular

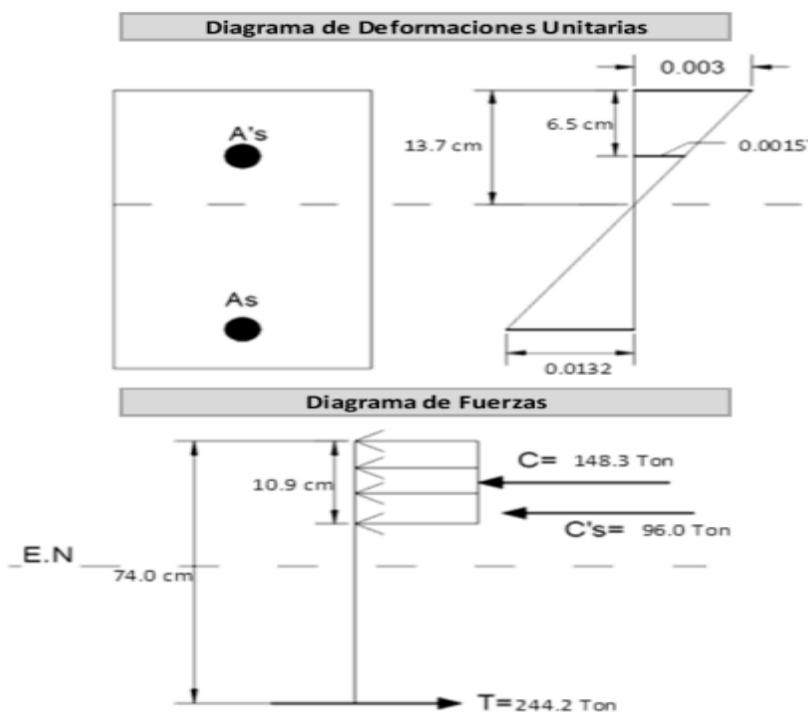


Figura 27. Diagrama de Deformaciones Unitarias y Diagrama de Fuerzas Momento Negativo.

La capacidad a cortante de la viga a “d” del estribo se resume en la *tabla 11*:

Tabla 11. Cortante resistente a "d" del estribo.

CORTANTE RESISTENTE		
h(m)	0.84	Altura de la Viga
b(m)	0.45	Ancho de la Viga
F`c (kgf/cm ²)	355.425	Resistencia a Compresión de la viga
Fy (kgf/cm ²)	4200	Esfuerzo de Fluencia del Acero

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

$r_s (m)=d'$	0.080	Recubrimiento cara a Tracción
$d (m)$	0.76	Longitud efectiva acero a Tracción
Φ	0.9	Factor de resistencia
$\Phi V_c (Ton)$	30	Resistencia del Concreto
#Barra	4	
#Ramas	2	
$A_v (cm^2)$	2.58	
$S (m)$	0.15	
$\Phi V_s (Ton)$	49	Resistencia del Acero
$\Phi V_c + \Phi V_s (Ton)$	79.87	Resistencia Total a Cortante

6.5.3 Evaluación Demanda – Capacidad

Se evalúa la demanda de capacidad estructural calculando el índice de sobre esfuerzo de la siguiente manera:

$$I = \frac{Demanda}{Capacidad}$$

Un índice de sobre esfuerzo mayor a la unidad representa un déficit en la capacidad estructural.

Tabla 12. Demanda - Capacidad Momento Positivo Vigas

Momento positivo		
$M_r (Ton-m)$	101.25	Momento Resistente de la sección
Viga Interior		
$M_u (+) (Ton-m)$	125.82	Momento (+) ultimo viga interna
I	1.24	Índice de sobre esfuerzo
Viga Exterior		
$M_u (+) (Ton-m)$	125	Momento (+) ultimo viga Externa
I	1.23	Índice de sobre esfuerzo

Tabla 13. Demanda - Capacidad Momento Negativo Vigas.

Momento Negativo		
$M_r (Ton-m)$	-149.73	Momento Resistente de la sección

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Viga Interior		
Mu (-) (Ton-m)	-139.3	Momento (-) ultimo viga interna
I	0.93	Índice de sobre esfuerzo

Viga Exterior		
Mu (-) (Ton-m)	-140.4	Momento (-) ultimo viga Externa
I	0.94	Índice de sobre esfuerzo

Tabla 14. Demanda - Capacidad Cortante a "d" del estribo.

Cortante (a "d" del estribo)		
ΦV_r (Ton)	79.87	Cortante Resistente de la sección

Viga Interior		
ΦV_{u_i} (Ton)	51.66	Cortante ultima viga interna
I	0.65	Índice de sobre esfuerzo

Viga Exterior		
ΦV_{u_e} (Ton)	51.81	Cortante ultima viga interna
I	0.65	Índice de sobre esfuerzo

Se tienen índices de sobre esfuerzo mayor a la unidad a flexión positiva, por lo que será necesario un reforzamiento para suplir la demanda. Se deberá realizar un análisis de la viga existente para poder comprobar que la viga aún tiene suficiente resistencia al corte para resistir las nuevas cargas requeridas y que cumpla con las capacidades de servicio de deflexión y control de grietas. Sin embargo, como se indicó en las anteriores tablas su resistencia a la flexión es inadecuada para soportar el aumento de las cargas.

7. Guía de cálculo y diseño del refuerzo de “FRP”

La presente guía de cálculo, ofrece el proceso descriptivo y numérico para diseñar el refuerzo con fibra de carbono (CFR) a flexión de los elementos estructurales analizados anteriormente y que requieren de su reforzamiento a causa de nuevas solicitaciones requeridas y a partir del estado inicial existente, tanto en lo que se refiere a los materiales y geometría, como a las solicitaciones que actúan en dicho elemento.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

La exposición del proceso se organiza de modo que se contempla, a la vez, la formulación y la resolución de un caso práctico. El avance ordenado en el proceso nos permitirá introducir de modo compendioso las explicaciones pertinentes que clarifican el proceso numérico. Esta manera de proceder facilita la comprensión del diseño y del proceso, como la verificación numérica de cada paso a dar y del conjunto del proceso, así como los valores que deben cumplir con alguna condición.

7.1 Verificaciones previas

Antes de proceder a calcular el posible refuerzo a flexión de la viga, hay que verificar la capacidad de las secciones correspondientes del elemento estructural en lo que se refiere a:

- Tantear la rentabilidad del posible refuerzo.
- Disposición para asumir la situación de solicitaciones iniciales, antes del refuerzo.
- Capacidad para asumir las solicitaciones requeridas para la situación reforzada, en situación accidental de incendio.

7.2 Refuerzo a flexión

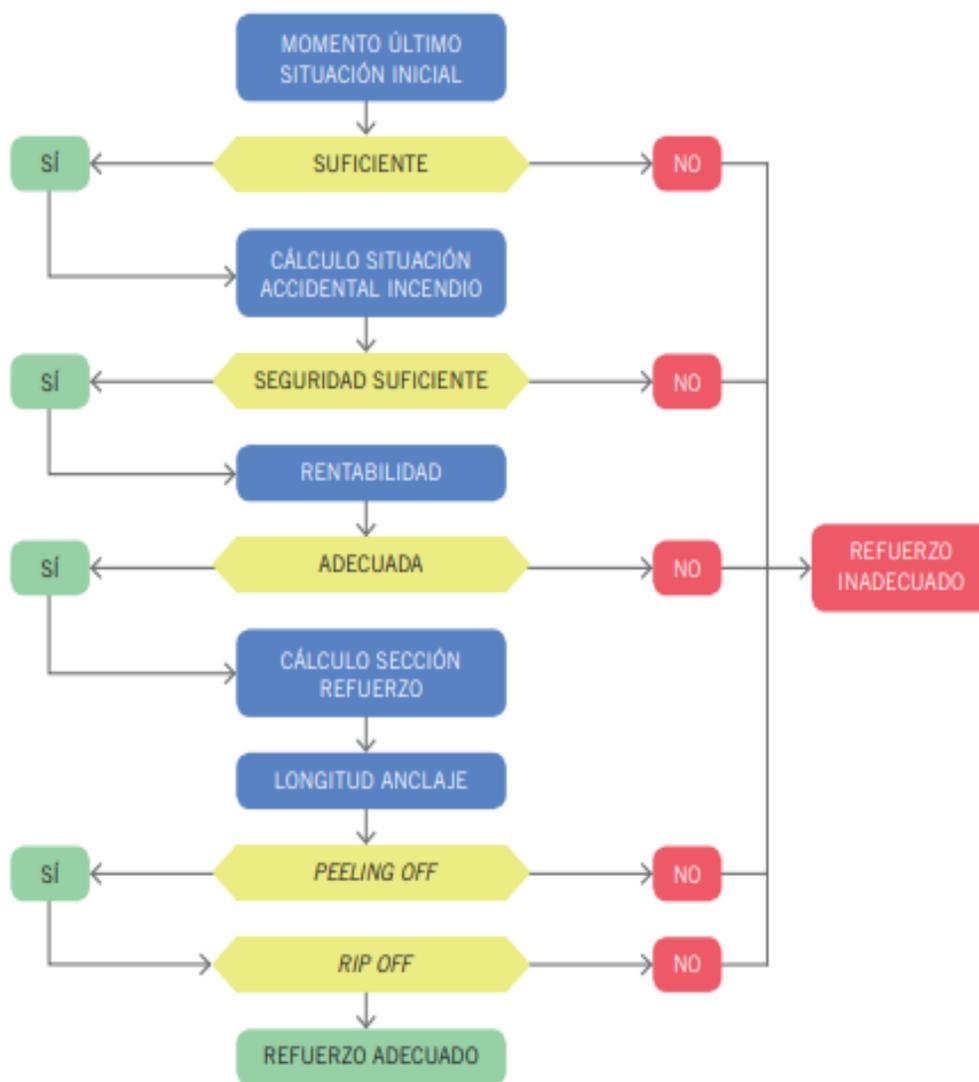
Para el cálculo de la resistencia a flexión, en condiciones de agotamiento de una sección reforzada por medio de láminas de FRP, se aplican las siguientes hipótesis:

- 1- Los cálculos de diseño se basan en dimensiones reales, en la distribución interna real del acero de refuerzo y en las propiedades reales del material del elemento existente a ser reforzado.
- 2- Las deformaciones en el refuerzo y en el concreto son directamente proporcionales a la distancia desde el eje neutro.
- 3- La deformación a compresión máxima en el concreto es igual a 0,003.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

- 4- La resistencia a tracción del hormigón es ignorada.
- 5- El reforzamiento de FRP tiene un comportamiento lineal-elástico hasta la rotura.
- 6- No existe deslizamiento relativo entre el refuerzo de FRP externo y el concreto.

7. REFUERZO A FLEXION



Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

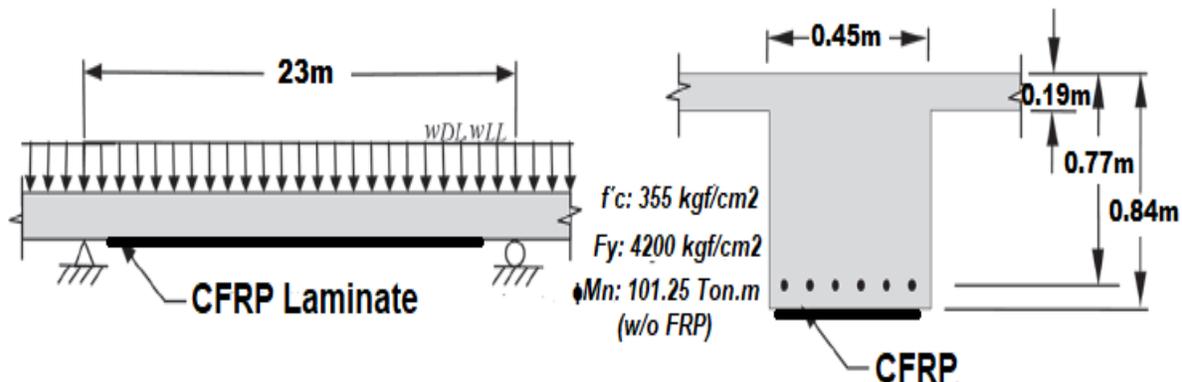


Figura 28. Esquema de la viga idealizada simplemente apoyada con Reforzamiento FRP externamente.

Carga/Momento	Cargas existentes	Cargas Anticipadas
Peso propio de elementos estructurales y accesorios no estructurales. DC	1.752 Ton/m	1.752 Ton-m
Peso propio carpeta de Rodamiento y de las instalaciones. DW	0.45 Ton/m	0.45 Ton-m
Carga viva vehicular. LL	Vehículo HS-20	Vehículo CC-14
Cargas Factorizadas. ($1.25_{DC}+1.50_{DW}+1.75_{LL}$)	N/A	N/A
Momento de Carga muerta M_{DC+DW}	36.5 Ton-m.	36.5 Ton-m.
Momento de carga Viva. M_{LL}	44.75 Ton-m	44.75 Ton-m
Momento de carga de servicio M_S	81.25 Ton-m	81.25 Ton-m
Límite de Momento sin reforzamiento. ($1.1M_{DC+DW}+0.75M_{LL}$)	N/A	73.71 Ton-m
Momento Factorizado. M_U ($1.25DC+1.50DW+1.75LL$)	101.25 Ton-m	125.81 Ton-m

Tabla 15. Cargas y Momentos Correspondientes.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Espesor por capa del FRP	t_f	1.4mm
Resistencia a La Tracción	f_{fu}^*	3.100 N/mm ²
Tensión por ruptura	ε_{fu}^*	0.015 mm/mm
Módulo de Elasticidad del FRP	E_f	165.000N/mm ²

Tabla 16. Propiedades del sistema FRP.

Por inspección, el nivel de fortalecimiento es razonable, ya que cumple con los criterios de límite de fortalecimiento especificados por la ecuación:

$$(\phi Rn_{exist.} = (1.1M_{DC+DW} + 0.75M_{LL})) = 73.71 \text{ Ton} - m$$

Es decir, la fuerza de momento existente sin FRP, $\phi Mn_{w/o} = 101.25 \text{ Ton} - m$, es mayor que el límite de momento no fortalecido: $(1.1M_{DC+DW} + 0.75M_{LL}) = 73.21 \text{ Ton} - m$. Los cálculos de diseño utilizados para verificar este resultado son los siguientes:

7.2.1 Calcular el diseño del sistema FRP (propiedades del material).

La viga se encuentra ubicada en un espacio exterior y se utilizara como material un FRP Lamínate, por lo tanto y según la tabla 9.1 (ACI-440), se sugiere un factor de reducción ambiental de 0.95.

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

Donde:

f_{fu} : Diseño de resistencia maxima a la traccion del FRP. (MPa).

C_E : Factor de Reducción ambiental.

f_{fu}^* : Resistencia a la traccion.

$$f_{fu} = (0.85)(2800\text{N/mm}^2) = \mathbf{2380\text{N/mm}^2}$$

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

Donde:

ε_{fu} : Deformacion de rotura media del refuerzo FRP. (mm/mm).

ε_{fu}^* : Ultima tension de ruptura del FRP, (mm/mm)

$$\varepsilon_{fu} = (0.85)(0.017 \text{ mm/mm}) = \mathbf{0.01445 \text{ mm/mm}}$$

7.2.2 Cálculos Preliminares

Propiedades del concreto:

$$\beta_1 = 0.80$$

$$E_c = 4700 * \sqrt{35.5 \text{ N/mm}^2} = 28000 \text{ N/mm}^2$$

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Propiedades del acero de refuerzo existente:

$$A_s = 30.60 \text{ cm}^2$$
$$A_s' = 57.87 \text{ cm}^2$$

Propiedades del FRP unido externamente:

$$A_f = n * t_f * w_f$$

Donde:

A_f : Area del FRP reforzada externamente, (mm^2)

n : Numero de capas de refuerzo a flexion con FRP.

t_f : Espesor nominal de una capa del reforzamiento de FRP. (mm)

w_f : Ancho de las capas de refuerzo de FRP. (mm)

$$A_f = (2 \text{ capas})(1.4 \text{ mm/capa})(450 \text{ mm}) = 1260 \text{ mm}^2$$

7.2.3 Determinar el estado existente de tensión en la viga

El estado existente de deformación se calcula asumiendo que la viga esta agrietada y que las únicas cargas que actúan sobre la viga en el momento de la instalación del FRP son las cargas muertas.

La deformación (ϵ_{bi}) es determinada de la siguiente manera:

$$\epsilon_{bi} = \frac{M_{DC+DW}(d_f - k * d)}{I_{cr} * E_c}$$

Donde:

M_{DC+DW} : Momento por cargas muertas.

d_f : Profundidad efectiva del refuerzo de flexion del FRP. (mm).

k : Relación entre la profundidad del eje neutro y la profundidad del refuerzo medida desde la fibra de compresión extrema.

I_{cr} : Momento de inercia de la seccion fisurada. (mm^4).

E_c : Modulo de elasticidad del concreto. (MPa).

$$k = \sqrt{2 * \rho_s * n_s + (\rho_s * n_s)^2} - \rho_s * n_s$$

Donde:

ρ_s : Relacion del refuerzo no pretensado.

n_s : Relacion modular de elasticidad entre el acero y el concreto = E_s/E_c .

$$\rho_s = \frac{A_s}{b * d}$$

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

$$\rho_s = \frac{30.60\text{cm}^2}{(45\text{cm})(77\text{cm})} = \mathbf{0.00883}$$

$$n_s = \frac{210000}{4700\sqrt{35.5}} = \mathbf{7.50}$$

$$k = \sqrt{2 * (0.00883)(7.50) + ((0.00883)(7.50))^2} - (0.00883)(7.50)$$

$$k = 0.304$$

Según las recomendaciones del ACI 318S-19, criterio adoptado también por el ACI 440, el momento de inercia de la sección fisurada puede ser determinado de la siguiente forma:

$$I_{cr} = \frac{b * d^3}{3} * k_d^3 + n_s * A_s * d^2(1 - k)^2$$

$$I_{cr} = \frac{(45)(77)^3}{3}(0.304)^3 + (7.50)(30.60\text{cm}^2)(77)^2(1 - 0.304)^2$$

$$I_{cr} = 851538.26\text{cm}^4 \quad (8515382600\text{mm}^4)$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{(36500\text{KN} \cdot \text{cm})(84.06\text{cm} - (0.304)(77\text{cm}))}{(851538.26\text{cm}^4)(2800\text{KN}/\text{cm}^2)}$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.000928$$

7.2.4 Determinar la tensión de diseño del sistema FRP

La tensión de diseño del FRP que explica el modo de falla de desunión ε_{fd} se calcula usando la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{F_c}{n * E_f * t_f}}$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{35.5\text{ N/mm}^2}{(2)(160000\text{ N/mm}^2)(1.2\text{mm})}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.00359 \leq (0.9)(0.01445)$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.00359$$

7.2.5 Estimación de C, profundidad al eje Neutral

Inicialmente se puede empezar a asumir un valor de profundidad de la línea neutra $c = 0,2 d$, donde d es el peralte efectivo de la sección a reforzar, mientras que la deformación inicial en el sustrato antes de colocar el refuerzo de FRP (ε_{bi}) se puede determinar a partir de un análisis elástico del elemento existente, considerando todas las cargas que actúan sobre el elemento durante la instalación del sistema de FRP. Se recomienda que el análisis elástico del elemento existente esté basado en las propiedades de la sección fisurada.

$$c = 0.20 * 77cm$$

$$c = 15.4cm$$

7.2.6 Nivel efectivo de tensión en el refuerzo FRP

El máximo nivel de deformación que se puede lograr en el refuerzo de FRP se registrará por el nivel de deformación desarrollado en el laminado o tejido de FRP en el punto donde el hormigón se agrieta, el punto donde rompe el FRP o el punto donde el FRP se despega del sustrato. La deformación máxima o el nivel de deformación eficaz del refuerzo de FRP para el Estado Límite Último establecido a partir de la compatibilidad de deformaciones a nivel de sección se determina como sigue:

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{84cm - 15.4}{15.4} \right) - 0.000928 = 0.0124$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.0124 > 0.00394$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0.00359$$

Se debe tener en cuenta que, para la profundidad del eje neutro seleccionada, la desunión estaría en el modo de falla porque la segunda expresión en la ecuación controla. Si la primera expresión gobernara,

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

entonces el aplastamiento del concreto estaría en modo de falla. Debido a que el FRP controla la falla de la sección, la deformación del concreto en el momento de la falla puede ser menor que 0.003 y se puede calcular usando semejanza de triángulos:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right)$$
$$\varepsilon_c = (0.00394 + 0.000928) \left(\frac{15.4cm}{84.06cm - 15.4} \right) = \mathbf{0.00101}$$

7.2.7 Calcular la deformación en el acero de refuerzo existente.

La deformación en el acero de refuerzo se puede calcular usando triángulos similares de acuerdo con:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right)$$
$$\varepsilon_s = (0.00394 + 0.000928) \left(\frac{77 - 15.4}{84.06 - 15.4} \right) = \mathbf{0.00404}$$

7.2.8 Calcular el nivel de tensión en el acero de refuerzo y en el FRP

Para determinar los niveles de tensión y con ello las fuerzas resultantes que aportan cada uno de los materiales involucrados en la capacidad resistente de la sección reforzada se recurre a las leyes constitutivas de los materiales:

- Para el acero de refuerzo a tracción:

Si la deformación unitaria en el acero a tracción es mayor que la deformación de fluencia, el esfuerzo en condiciones últimas es directamente igual al valor del esfuerzo de fluencia del acero (f_y).

$$f_s = F_y, \text{ si } \varepsilon_s \geq \varepsilon_y$$

Sin embargo, si la deformación unitaria del acero a tracción es menor que la deformación de fluencia el esfuerzo generado es:

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

$$f_s = E_s * \varepsilon_s, \text{ si } \varepsilon_s < \varepsilon_y$$

$$\begin{aligned} f_s &= (210000)(0.00434) \leq 420 \text{MPa} \\ f_s &= 848 \text{MPa} \leq 420 \text{MPa} \\ \text{por eso, } f_s &= 420 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

La lámina o tejido de FRP, por tener un comportamiento lineal elástico hasta la rotura, el esfuerzo en cualquier instante se determina como:

$$\begin{aligned} f_{fe} &= E_f * \varepsilon_{fe} \\ f_{fe} &= (165000 \text{ N/mm}^2)(0.00365) \\ f_{fe} &= 584 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

7.2.9 Cálculo de las fuerzas internas y verificación de equilibrio.

Los factores de bloque de tensión del concreto se pueden calcular según indicaciones ACI-318. El factor de bloque de tensión aproximado también se puede calcular basándose en la relación de tensión-deformación parabólica del concreto de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{4\varepsilon_c' - \varepsilon_c}{6\varepsilon_c' - 2\varepsilon_c} \\ \varepsilon_c' &= \frac{1.7 * f_c'}{E_c} = \frac{(1.7)(35.5)}{28000} = 0.00217 \\ \beta_1 &= \frac{4 * (0.00217) - (0.00109)}{6 * (0.00217) - 2 * (0.00109)} = 0.70 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{3\varepsilon_c' \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2} \\ \alpha_1 &= \frac{3 * (0.00217)(0.00109) - (0.00109)^2}{3 * (0.70)(0.00217)^2} = 0.60 \end{aligned}$$

El equilibrio de fuerzas se verifica chequeando la estimación inicial de "c" con la siguiente ecuación:

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 \beta_1 F_c b}$$
$$c = \frac{(3060 \text{ mm}^2)(420 \text{ N/mm}^2) + (1890 \text{ mm}^2)(584 \text{ N/mm}^2)}{(0.60)(0.70)(35.5 \text{ N/mm}^2)(450 \text{ mm})}$$
$$c = 35.6 \text{ cm}$$
$$c = \mathbf{35.6 \text{ cm} \neq 15.4 \text{ cm}}$$

El equilibrio de las fuerzas es calculado por medio de la determinación del nivel de tensiones de los materiales constituyentes. Así, el equilibrio interno de las fuerzas es satisfecho si, y solamente si, es correcto el valor de “c”.

La profundidad del eje neutro debe ser encontrada, al satisfacer simultáneamente las ecuaciones para “c”, repitiendo los ítems 7.2.6 al 7.2.9 hasta lograr obtener el equilibrio interno de las fuerzas y la compatibilidad de las deformaciones.

Los valores de fuerza resultante en cada uno de los materiales involucrados en la capacidad resistente de la sección reforzada se determinan como sigue (Figura 5):

- Para el acero de refuerzo a tracción: $F_s = f_s A_s$ donde A_s es el área del acero de refuerzo.
- Para el refuerzo de PRF: $F_{fe} = f_{fe} A_f$ donde A_f es el área del refuerzo de FRP.
- Para el hormigón a compresión: $F_c = \alpha_1 f_c \beta_1 c b$

Donde α_1 y β_1 son los coeficientes de transformación de cualquier ley que modele el concreto a compresión en un diagrama rectangular equivalente (Figura 29).

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

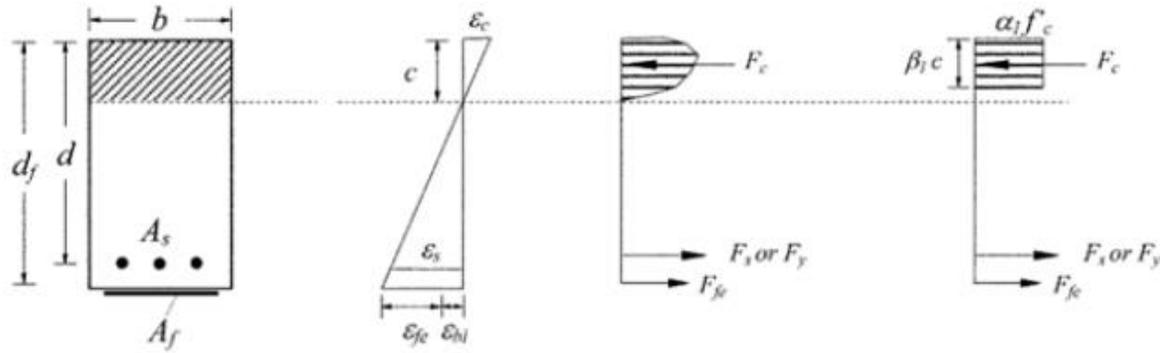


Figura 29. Esquema de deformaciones y de fuerza a nivel de sección. ACI 440-23

7.2.10 Ajuste de “c” hasta alcanzar el equilibrio de fuerzas

Se debe realizar las iteraciones necesarias hasta lograr obtener el valor de “c” para lograr el equilibrio de fuerzas:

$$c = 22.42\text{cm}; \epsilon_s = 0.00399; f_s = f_y = 420 \text{ N/mm}^2; \beta_1 = 0.72; \alpha_1 = 0.78$$

$$f_{fd} = 593.01 \text{ N/mm}^2$$

$$c = \frac{(3060\text{mm}^2)(420 \text{ N/mm}^2) + (1890\text{mm}^2)(593.01 \text{ N/mm}^2)}{(0.072)(0.77)(35.5 \text{ N/mm}^2)(450\text{mm})}$$

$$c = 24.7\text{cm}$$

7.2.11 Componentes de la resistencia a la Flexión

Una vez determinadas todas las fuerzas resultantes a nivel de sección, se procede a chequear el equilibrio de fuerzas a través de la siguiente expresión:

$$F_c - F_s - F_{fe} = 0$$

De no cumplirse esta última condición se vuelve a repetir el proceso con un nuevo valor de línea neutra (proceso iterativo), hasta obtener el valor definitivo de profundidad de línea neutra que asegure el verdadero equilibrio a nivel de sección. Cuando se alcance el equilibrio de fuerzas se procede a determinar el momento flector resistente de la sección reforzada con tejidos o láminas de PRF (ϕMn), a

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

través de la siguiente expresión, tomando momento con respecto al hormigón en compresión:

$$\phi M_n = \phi \left[A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) + \psi A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 * c}{2} \right) \right]$$

En la expresión anterior, como se había indicado anteriormente, el coeficiente $\psi f = 0,85$ es un coeficiente reductor de resistencia adicional aplicado únicamente a la contribución a flexión del laminado o tejido de FRP. En el caso del factor de reducción de la capacidad nominal a flexión ϕ , al reforzar elementos estructurales a flexión con FRP adherido externamente, se reduce la ductilidad de las secciones, muchas veces de manera insignificante, pero cuando es muy baja se debe compensar con una alta reserva de resistencia que se logra a través de dicho factor, el cual se determina según el nivel de deformación del acero a tracción en el Estado Límite Último, tal y como lo plantea el ACI 318.

Contribución del acero a la flexión: $M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 * c}{2} \right)$

$$M_{ns} = (0.00306 m^2)(42000 \text{ Ton}/m^2) \left(0.77m - \frac{(0.72)(0.224m)}{2} \right)$$

$$M_{ns} = 88.54 \text{ Ton. m}$$

Contribución del FRP a la flexión: $M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 * c}{2} \right)$

$$M_{nf} = (0.00126)(59300 \text{ Ton}/m^2) \left(0.84m - \frac{(0.72)(0.224m)}{2} \right)$$

$$M_{nf} = 56.74 \text{ Ton. m}$$

$$M_n = M_{ns} + \phi M_{nf}$$

$$M_n = 88.54 \text{ Ton. m} + (0.85)(56.74 \text{ Ton. m})$$

$$M_n = 136.77 \text{ Ton. m}$$

$$M_n = 136.77 \text{ Ton. m} \geq M_u = 125 \text{ Ton. m}$$

La sección reforzada es capaz de sostener el nuevo momento requerido.

7.2.12 Tensiones de servicio en el acero de refuerzo y en el FRP

Se calcula la profundidad elástica hasta el eje neutro agrietado. Esto se puede simplificar con la siguiente ecuación:

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

$$k = 0.3573$$

Donde:

$$\rho_s: \text{Relacion del reforzamiento no preesforzado}, \rho_s = \frac{A_s}{b * d} = \frac{30.60\text{cm}^2}{(45\text{cm})(77\text{cm})} = 0.00883$$

E_s : Modulo de elasticidad del acero, $E_s = 210000\text{Mpa}$.

E_c : Modulo de elasticidad del concreto, $E_c = 4700\sqrt{35.5}\text{Mpa} = 28000\text{Mpa}$.

$$\rho_f: \text{Relacion del reforzamiento del FRP}, \rho_f = \frac{18.90\text{cm}^2}{(45\text{cm})(84\text{cm})} = 0.005$$

E_f : Modulo de elasticidad del FRP, $E_f = 165000\text{Mpa}$

$$k * d = (0.3573)(84\text{cm}) = 30.01\text{cm}$$

La capacidad de servicio del elemento (deflexiones y anchos de las grietas) bajo cargas de servicio debe satisfacer las disposiciones que dispone la ACI 318. El efecto del reforzamiento con FRP se puede evaluar utilizando el análisis de la sección transformada.

Para evitar deformaciones inelásticas en los elementos de concreto armado y reforzados con láminas de FRP exteriormente, se debe evitar que el refuerzo interno de acero existente ceda bajo niveles de carga de servicio, especialmente en los elementos sometidos a cargas cíclicas (El-Tawil et al. 2001). La tensión en el refuerzo de acero bajo carga de servicio debe limitarse al 80% de la resistencia a la fluencia. Además, la tensión de compresión en el hormigón bajo carga de servicio debe limitarse al 60% de la resistencia a la compresión.

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

$$f_{s,s} = 299.02 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{s,s} = 299.02 \leq 0.80 f_y$$

$$f_{s,s} = 299.02 \text{ N/mm}^2 \leq 336 \text{ N/mm}^2$$

El nivel de tensión en el acero de refuerzo está dentro del límite recomendado.

7.2.13 Limite de ruptura por fluencia al servicio del FRP

El esfuerzo en el FRP bajo cargas de servicio se puede calcular de la siguiente forma:

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

$$f_{f,s} = 145.84 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{f,s} = 145.84 \text{ N/mm}^2 \leq 0.55 f_{fu}$$

$$f_{f,s} = 145.84 \text{ N/mm}^2 \leq 1292.5 \text{ N/mm}^2$$

El nivel de tensión en el FRP causado por el momento está dentro del límite recomendado.

Todo el proceso de cálculo para el dimensionamiento del refuerzo de FRP a flexión para las vigas que lo solicitaron, se resume en una hoja de cálculo “Excel” cuya imagen se adjunta como tabla. Esta hoja de cálculo tiene notas aclaratorias en prácticamente todas las casillas, con lo que la introducción de datos y su interpretación resulta sencilla.

Por otra parte, la visión de conjunto facilita la consulta de todas las fórmulas del proceso de cálculo y estudio de resultados.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de "FRP" para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

INSTRUCCIONES DE TEXTO																					
Datos en Rojo Oscuro: Se deben ingresar																					
Datos en Azul: Son determinados por la programación.																					
Datos en Rojo: Notas aclaratorias																					
Datos en verde: Siempre verificar que la interacción es 1																					
Factor de carga	FC	1.1																			
Momento último	Mu	101.25	ton-m					Momento de servicio adicional por sobrecarga muerta													
Momento de Servicio	Ms	92.05	ton-m					Ms-SCM	0.00 ton-m												
Porcentaje de Ms asociado a CM		45%	MSCM	41.42	ton-m			Momento de servicio adicional por carga viva													
Porcentaje de Ms asociado a CV		55%	MSCV	50.63	ton-m			Ms-cvb	0.00 ton-m												
DATOS GEOMETRICOS DE SECCION, EN CM					MOMENTO DE INERCIA SECCION AGRIETADA. Icr																
30x90 cm					f'c	355.00	kg/cm ²	SECCION TRANSFORMADA													
b	h	r	d	tf, losa	Ec-NTC	263,780.21	kg/cm ²	CONCRETO CLASE 1													
cm	cm	cm	cm	cm	Ec-ACI	284,766.07	kg/cm ²	28003	Mpa	280034.819	kg/cm ²										
45	84	7	77	0.00001	Ec usuario	263,780.21	kg/cm ²														
					Es	2,039,000.00	kg/cm ²	2100000	kg/cm ²												
					n	7.50	As	30.6	cm ²												
<table border="1"> <tr> <td>Reforzo</td> <td>df, en cm</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Barras FRP</td> <td>83.02</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Tejido/Lam.</td> <td>84.00</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Especificar</td> <td>84.00</td> <td></td> </tr> </table>					Reforzo	df, en cm		Barras FRP	83.02		Tejido/Lam.	84.00		Especificar	84.00		nAs	229.47			
Reforzo	df, en cm																				
Barras FRP	83.02																				
Tejido/Lam.	84.00																				
Especificar	84.00																				
Indique con "X" si es Varilla o Tejido/Laminado					PROFUNDIDAD DE X																
Tejido/Lam	x	FIB 600/50 CFS			x1	31.8995	INTERACCION	12546.2145	393.3045												
Varilla	X	BAR 1000 CFS			Icr	953,660.87	cm ⁴														
Se propone C y se revisa al final por equilibrio					Icr usuario	851,455.57	cm ⁴														
←	224.216	1.00			Icr/lg	0.43															
Esfuerzo último en tensión FRP, fFu					ps	0.008831															
Tejido/Lam	3,800.00	MPa			pf	0.003333															
Varilla	2,200.00	MPa			Es/Ec	7.50															
					Ef/Ec	5.71															
					df/d	1.09															
					$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{d_f}{d}\right)\right) - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)} = 0.3405$																

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de "FRP" para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

REFUERZO POR FLEXION ACI 440-R23

TEJIDOS Y LAMINADOS



Proyecto:

Monografía

Fecha

24 de Octubre de 2024

Hoja

1 DE 2

MOMENTOS ACTUANTES EN CONDICIONES DE SERVICIO

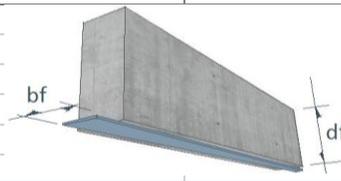
Momento por Peso Propio	M_{pp}	36.50	ton-m	357,942,725.00	N-mm
Momento por Sobrecarga Muerta	M_{scm}	0.00	ton-m	0.00	N-mm
Momento por Carga Viva	M_{cv}	44.75	ton-m	438,847,587.50	N-mm
Momento por Carga Viva Peatonal	M_{cvb}	0.00	ton-m	0.00	N-mm

PROPIEDADES GEOMETRICAS DE LA SECCION

d	77.00	cm	k	0.3405	0.3036892
A	3780.00	cm ²	I _{cr}	851,455.57	cm ⁴
I _g	2,222,640.00	cm ⁴	0.3I _g	666,792.00	
r	7.00	cm			

PARAMETROS DE DISEÑO

$f'c$	35.50	MPa	Modulo E del Concreto	28000	28,000	MPa
Tejido o laminado	Modulo de Elasticidad FRP	165,000	MPa	Núm. de capas FRP, n	2	
	Espeesor	FIB 600/50 CFS	1.4	mm	ϵ_{fu}	0.0145
	Ancho de FRP, $\Sigma bf-x$ ó $\Sigma bf-y$	450	mm	A_f	1260.00	mm ²
Varillas FRP	Modulo de Elasticidad Varilla	158,000	MPa	Porcentaje de área efect.	0.91	
	Diámetro como fracción	3/8	pulgada	ϵ_{fu}	0.0140	
	Cantidad de varillas	12		A_f	778.11	mm ²
Ancho de Sección	450	mm	Area FRP	1260	mm ²	
df	840.00	mm	E, FRP	165,000	MPa	
Prof. c del Eje Neutro prop.	0.2d	224	mm	Núm. Capas	2	
c	282	mm	Reforzamiento Seleccionado	FIB 600/50 CFS		
	224.2155245					



ACERO DE REFUERZO

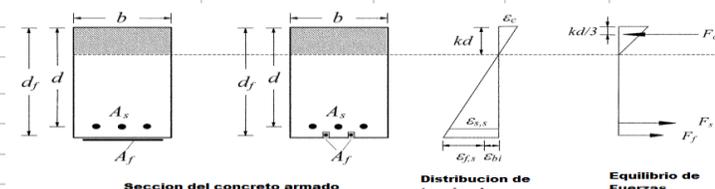
f_y	4,200.00	kg/cm ²	A_s	30.6	cm ²
E_s	2,100,000.00	kg/cm ²			

DEFORMACION DE DISEÑO DEL SISTEMA FRP

Deformación inicial en la trabe	$\epsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - kd)}{I_{cr} E_c} = 0.00091008$				
Límite de la deformación a la que puede ocurrir la desadherencia					
			$0.90\epsilon_{fu} = 0.01301$	Tejidos y laminados	
			$0.70\epsilon_{fu} = 0.00980$	Varillas [NSM-FRP]	
	$\epsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'c}{nE_f t_f}} = 0.003593991 <=$		0.013005		
	$\epsilon_{fd} = 0.003593991$				

DEFORMACION EFECTIVA EN EL SISTEMA FRP

$\epsilon_{fe} = 0.003 \left[\frac{d_f - c}{c} \right] - \epsilon_{bi} = 0.007339917 >$	$\epsilon_{fd} = 0.003593991$				
Tipo de falla	Desadherencia del FRP				
ϵ_{fe}	0.003593991				
Deformación del concreto a la falla	$\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) = 0.00164$				



DEFORMACION EN EL ACERO DE REFUERZO

$\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) = 0.00399$					
---	--	--	--	--	--

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de "FRP" para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

NIVEL DE ESFUERZO EN EL ACERO DE REFUERZO Y EL SISTEMA FRP						
Refuerzo	fs	822.16	N/mm ²		8,383.69	kg/cm ²
	Utilizar	4,200.00	kg/cm ²			
Sistema FRP	f _{fe} = E _f ε _{fe}	593.01	N/mm ²		6,047.00	kg/cm ²
PARAMETROS DEL BLOQUE EQUIVALENTE DE ESFUERZOS EN COMPRESION						
	$\epsilon_c = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{c}{d_f - c} \right) = 0.00164$			Acero Ordinario:		
	$\epsilon'_c = \frac{1.7f'_c}{E_c} = 0.00216$			r	7	cm
	$\beta_1 = \frac{4\epsilon'_c - \epsilon_c}{6\epsilon'_c - 2\epsilon_c} = 0.72320$			d	77	cm
	$\alpha_1 = \frac{3\epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3\beta_1 \epsilon_c^2} = 0.78458$			Es	199,957	MPa
					As	30.6
				$\epsilon_s = (d - c) \left(\frac{\epsilon_f + \epsilon_{bi}}{d_f - c} \right) = 0.003939$		
				$F_s = E_s \epsilon_s = 787.64 \text{ MPa}$	>	420.00
				Utilizar	420.00	MPa
				(4,282.81	kg/cm ²)
REVISION DEL EQUILIBRIO						
			bef		45	cm
			tf		0.00001	cm
			$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{(\alpha_1 f'_c)(\beta_1) b_w} = 224.21552 \text{ mm}$		OK	
					224.21552	
MOMENTO RESISTENTE DE LA SECCION REFORZADA						
$\phi = \begin{cases} 0.9 & \text{si } \epsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\epsilon_t - \epsilon_{sy})}{0.005 - \epsilon_{sy}} & \text{si } \epsilon_{sy} < \epsilon_t < 0.005 \\ 0.65 & \text{si } \epsilon_t \leq \epsilon_{sy} \end{cases}$			Deformación de tensión neta en el acero en tensión extremo en resistencia nominal		ε _t	= 0.00399
			Deformación correspondiente a la fluencia		ε _{sy}	= 0.00200
			Factor de reducción de resistencia		φ	= 0.81602
$M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) = 88.54 \text{ ton-m}$			Esfuerzos bajo cargas de servicio		fs,s	315.25 MPa
$M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) = 57.82 \text{ ton-m}$					0.80fy	336.00 MPa OK
$\phi M_n = \phi [M_{ns} + \psi_f M_{nf}] = 137.69 \text{ ton-m}$					ff,s	145.84 MPa
					0.55ffu	1,985.50 MPa OK

8. Sistemas convencionales de rehabilitación de estructuras vs sistema frp

Dentro de las intervenciones de rehabilitación, las de refuerzo son sin duda las que presentan una mayor complejidad, tanto a nivel de diseño como de cálculo y de ejecución. La principal razón de ello deriva del incremento de la resistente original que las caracteriza. Consecuentemente, además de problemas constructivos, se plantean algunas situaciones importantes de alcance estructural:

- El refuerzo de un elemento implica generalmente una alteración importante de la distribución de rigideces en la estructura, que debe ser analizado en todas sus consecuencias.
- En el planteamiento y ejecución del refuerzo debe considerarse el carácter evolutivo de la estructura afectada, que modifica su configuración en una etapa intermedia de su vida. En una sección de un elemento reforzado coexisten materiales antiguos y nuevos, con estados tenso-deformación diferentes en fibras contiguas.
- El proceso de rehabilitación debe solucionar eficazmente la transferencia de esfuerzos entre el elemento original y el refuerzo nuevo. De poco sirve disponer un refuerzo de gran capacidad resistente si no se garantizan los mecanismos para que soporten las cargas solicitadas. En consecuencia, la unión o interface entre pieza original y refuerzo (adhesivos, conectores, juntas, etc.) debe ser especialmente considerada.
- Si no se adoptan medidas especiales y no se consideran los efectos reológico, el refuerzo solo recogerá una fracción de las cargas que se introduzcan posteriormente a su ejecución (en función de su rigidez relativa y de los mecanismos de transferencia). Por tanto, la descarga parcial del elemento estructural afectado y su posterior entrada en carga han de ser analizados al plantear el caso.
- La introducción de tensiones iniciales en los elementos de refuerzo para mejorar su entrada en

carga, puede tener consecuencias importantes sobre la distribución de esfuerzos en la estructura.

La consideración de algunas de las situaciones antes mencionadas, exige frecuentemente la utilización de procedimientos no convencionales de análisis, capaces de reproducir adecuadamente los aspectos diferenciales del problema. El estudio comprende diversos niveles de análisis, desde el comportamiento tenso-deformaciones de los materiales, hasta la consideración de la redistribución de esfuerzos en el conjunto de la estructura reforzada, pasando por análisis de sección y pieza.

A continuación, se describen algunos sistemas usuales de refuerzo de estructuras de concreto armado, exponiéndose los criterios fundamentales sobre su concepción, diseño, cálculo y ejecución. Las diferencias formales y de sollicitación entre los elementos estructurales básicos de la edificación, aconsejan estudiar separadamente los sistemas de refuerzo aplicables a cada uno de ellos.

En líneas generales, puede hablarse de tres grandes alternativas para el refuerzo de elementos estructurales de concreto armado:

- Refuerzo mediante recrecidos con concreto armado.
- Refuerzo mediante adosado de perfiles metálicos (generalmente de acero).
- Refuerzo mediante disposición de sistemas FRP.

A continuación, se realiza una comparación de las características generales y las principales aplicaciones de estos refuerzos.

8.1 Refuerzo mediante recrecido con concreto armado

Una opción evidente para reforzar un elemento estructural de hormigón consiste en recrecerlo con una sección adicional de hormigón convenientemente armado. Este sistema presenta la ventaja de una gran compatibilidad entre el sistema original y el de refuerzo, así como una amplia superficie de contacto entre

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

ambos, que posibilita la necesaria transferencia de esfuerzos. De igual forma, es posible aumentar considerablemente la sección del concreto armado e incorporar una considerable cuantía de nuevas armaduras que, en caso necesario, pueden conectarse con el acero original mediante algún tipo de anclaje. El resultado final, es un elemento notablemente monolítico, capaz de incrementar notablemente la resistencia y rigidez del elemento original.

Una ventaja de este sistema es que presenta un buen comportamiento frente al fuego, algo que no sucede en la mayor parte de los restantes sistemas de refuerzo.

Como inconveniente fundamental de este sistema de refuerzo cabe mencionar la necesidad de aumentar de modo considerable las dimensiones originales del elemento, una elevada dificultad constructiva y, consecuentemente, un mayor costo en las operaciones. En términos estructurales hay que indicar que el incremento de rigidez que este sistema conlleva puede alterar la distribución de esfuerzos en el conjunto de la estructura.

8.1.1 Diseño reforzamiento con recrecimiento de la sección de la viga para el caso de estudio.

Para el reforzamiento de las vigas se realizará un recalce de las vigas del puente aumentando su sección a un ancho de 0.65m y un alto de 0.75m como se muestra en la *figura 30*.

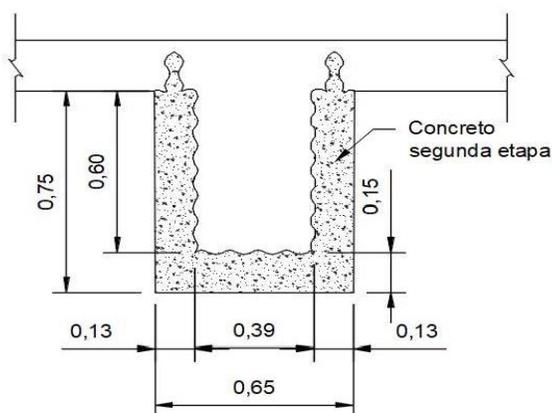
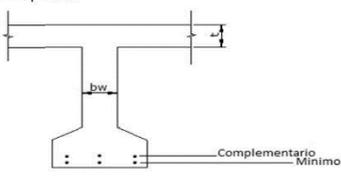


Figura 30. Recalce de Vigas

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de "FRP" para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

DISEÑO DE VIGA REFORZADA					
Proyecto:	Hatovial				
Código del Proyecto:	62				
Códigos:	CCP - 14 Y AASHTO 2012				
Puente:	Rio Grande				
Luz (m)	23.00	Medida por el eje de la vía			
Ancho del puente (m)	9.17	Ancho radial del puente			
Diseño a flexión de vigas T					
Nv	4	Número de vigas longitudinales			
S	2.30 m	Distancia entre vigas			
Luz	23.00 m	Longitud de la viga			
b	0.65 m	Ancho del patín			
t	0.19 m	Espesor de la losa			
h+t+a	0.94 m	Altura de la viga			
b _w	0.65 m				
r	0.12 m	Distancia del centroide de las barras al borde inferior de la viga			
f _c	280 kg/cm ²	Resistencia a la compresión			
f _y	4200 kg/cm ²	Fluencia del acero			
d	0.82 m				
a	3.20 cm	Altura del bloque de compresión			
b _{e1}	2.73 m	12*T _v +T _v Diseño como viga rectangular			
b _{e2}	5.75 m	L _v /4			
b _{e3}	2.30 m	Espaciamiento entre vigas			
b _{e4}	2.29 m	Ancho aferente para viga extrema			
b _e	2.29 m	Ancho efectivo elegido			
M _u	125.82 ton-m	Momento de diseño			
Si la sección es rectangular					
m	17.65				
K	8.20				
Cuantía Mínima	0.00333				
A _{s min}	17.76 cm ²	Acero de refuerzo mínimo			
Cuantía	0.00221	Cuantía calculada			
A _{s1}	41.42 cm ²	Acero sección rectangular con cuantía calculada			
A _s	41.42 cm ²	Acero sección rectangular			
Si la sección es T					
k	N.A.	m ²			
a	N.A.	m			
A _{s min1}	N.A.	cm ²			
A _{s min2}	N.A.	cm ²			
A _{s min}	N.A.	cm ²			
A _{s1}	N.A.	cm ²			
A _s	N.A.	cm ²			
		Acero de refuerzo para sección T			
A _s	41.42 cm ²	Acero de Refuerzo Principal Requerido			
Numero de la barra 2	8	Refuerzo minimo			
Área de barra 2	5.10 cm ²				
Cantidad escogida	5 und				
Acero suministrado 2	25.50 cm ²				
Separación	9.0 cm				
Numero de la barra 1	8	Refuerzo complementario			
Área de barra 1	5.10 cm ²				
Cantidad escogida	6 und				
Acero suministrado 1	30.60 cm ²				
Separación	7.5 cm				
A _{s1}	56.10 cm ²	Acero total suministrado			
Cálculo de la altura efectiva d					
Capa	d _c	N _i	C ₁	N ₂	C ₂
1	1	8	6		
2	1	8	6		
3	0	2	0		
A ₁ [cm ²]	A ₂ [cm ²]	Y ₁ [m]	Y ₂ [m]	(A ₁ Y ₁) ₁ [cm ³]	(A ₁ Y ₂) ₂ [cm ³]
30.60	0.00	0.07540		230.72	0.00
30.60	0.00	0.16540		506.12	0.00
0.00	0.00	0.00000		0.00	0.00
∅		0.12 m			
d _c corregido		0.82 m			
				Distancia del centroide de las barras al borde inferior de la viga	



Cumple

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Finalmente, el reforzamiento propuesto se presenta en la *figura 31*:

DISEÑO A CORTANTE		
Vu	69.75	Cortante ultima
h ₁ (m)	0.84	Altura de la viga existente
h ₂ (m)	0.94	Altura de la viga final
b (m)	0.65	Ancho de la viga final
f'c (MPa)	35.542	Resistencia a compresión de la viga
f _y (MPa)	420	Esfuerzo de Fluencia del acero
d (m)	0.770	Longitud efectiva acero a tracción
d (m)	0.8900	Longitud efectiva acero a tracción
φ	0.9	Factor de reducción 5.5.4.2
φV _c (ton)	45	Resistencia del concreto 5.8.3.3
Acero existente		
# Barra	4	
# Ramas	2	
A _v (cm ²)	2.58	
Separación (m)	0.25	
φV _s (ton)	30	Resistencia del acero 5.8.3.3
Acero Complementario		
# Barra	4	
# Ramas	2	
A _v (cm ²)	2.58	
Separación (m)	0.3	
φV _s (ton)	29	Resistencia del acero 5.8.3.3
φV _c + φV _s (ton)	104	Resistencia total a cortante
Chequeo	Cumple	

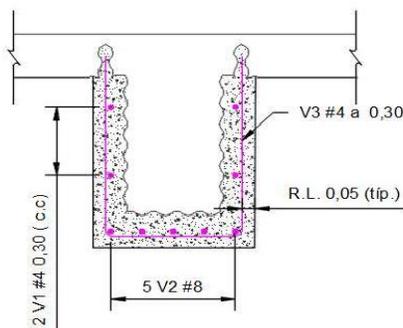


Figura 31. Reforzamiento de vigas mediante el sistema de recrido.

8.2 Refuerzo mediante perfiles metálicos

Otra opción habitual de refuerzo consiste en unir el elemento original de hormigón armado a uno o varios perfiles metálicos de modo que se transforme en un elemento mixto. Es el caso de algunos tipos de refuerzo ampliamente utilizados, como por ejemplo el refuerzo de soportes mediante angulares empresillados, o el refuerzo de vigas o losas mediante el adosado inferior de perfiles “doble T”, convirtiéndolas de esta forma en vigas mixtas.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Se trata de un sistema de refuerzo muy eficaz en términos estructurales que, al igual que el recrecido mediante concreto armado, permite incrementar considerablemente la rigidez y la resistencia del elemento original. Constructivamente, el refuerzo mediante perfiles metálicos presenta menos dificultades que el recrecido con el concreto. Por ello, los costos del refuerzo mediante perfiles son generalmente inferiores a los realizados mediante recrecido con concreto armado.

Sin embargo, el diferente comportamiento del material original y el de refuerzo puede generar problemas de compatibilidad. A sí mismo, la transferencia de esfuerzos al refuerzo esta necesariamente más concentrada y puede plantear problemas que reduzcan la eficacia del sistema o compliquen gravemente su ejecución. De hecho, en general la transferencia de esfuerzos por adherencia y rozamiento es insuficiente para hacer entrar en carga este tipo de refuerzos, siendo normalmente necesario disponer anclajes de tipo mecánico o conectar directamente los nuevos perfiles metálicos a los nudos o a los elementos estructurales inmediatos a través de piezas específicas (capiteles, collarines, etc.).

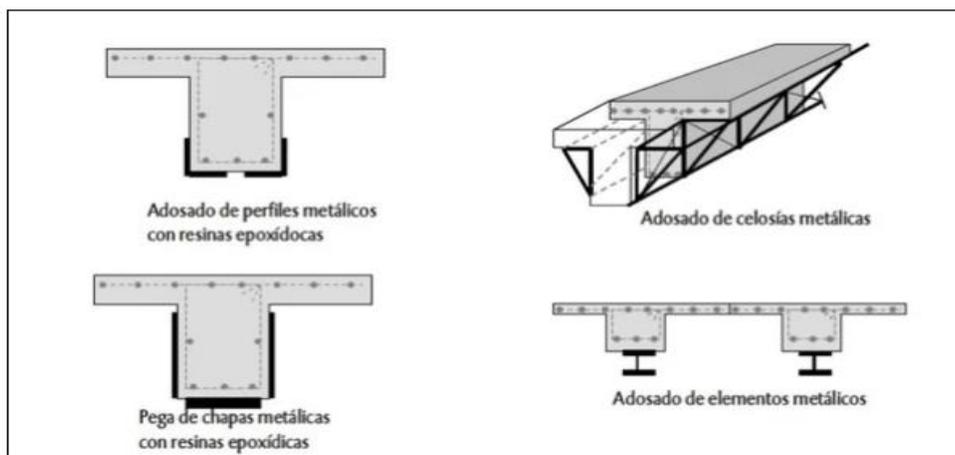


Figura 32. Reforzamiento con perfiles metálicos.

La fibra de carbono, como tal, tiene ventajas y desventajas comparándola con las otras opciones de rehabilitación para estructuras de concreto armado. Empezando por lo primero, las ventajas, la más

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

conocida de todas es la ligereza. Precisamente, la fibra de carbono al ser tan resistente, que es otra de sus

virtudes, nos permite usar una menor cantidad de material para la misma resistencia que necesitaría una pieza metálica. Al usar menos material, y a ser éste de una baja densidad, permite ahorrar una considerable cantidad de material en acero.

Por otro lado, también es un material resistente a los agentes externos. Lógicamente la fibra de carbono se trata con resinas y epóxicos muy resistentes, pero presenta la ventaja, por ejemplo, frente a una pieza metálica, de no presentar corrosión. El módulo de elasticidad frente a piezas metálicas también es superior. Frente a las variaciones de temperatura, conserva también su forma.

La elección entre fibra de carbono y otros materiales se basa en su combinación única de alta resistencia, baja densidad y larga duración. La resistencia a la tracción de las fibras de carbono es varias veces mayor que la del acero, pero pesa menos, lo que mejora enormemente su rendimiento/eficiencia. La rigidez superior de las fibras de carbono las hace perfectas para elementos estructurales extremadamente rígidos, de modo que el desplazamiento mínimo resulte de la presión. Además, tiene una baja expansión térmica que ayuda a mantener la integridad estructural ante amplias variaciones de temperatura.

Los sistemas FRP en comparación con la rehabilitación con el sistema recrecido alcanza similares resistencias (ver *figura 33*), con la gran ventaja de que la sección no aumenta mucho su masa debido al peso de la fibra de carbono, de igual forma la estética del elemento estructural no cambia.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de "FRP" para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

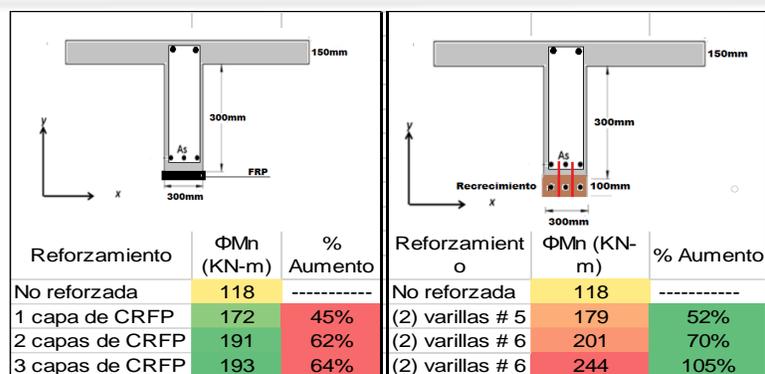


Figura 29. Comparación del aumento de resistencia de un sistema de "FRP" con el recrecimiento de una sección en una viga de concreto armado

9. Conclusiones

- Los sistemas con Fibras (FRP) en forma de tejidos o laminas aparecen como una alternativa eficaz y justificada a los sistemas de reforzamiento tradicionales de elementos de concreto armado. Estos materiales presentan un comportamiento tenso-deformacional lineal-elástico hasta la rotura y sus principales propiedades mecánicas, como la resistencia y deformación última a la tracción, se ven afectadas por la degradación que sufren ante la exposición de diferentes condiciones ambientales.
- El sistema de FRP, registra propiedades físico-mecánicas que son deseables para ser usadas como reforzamiento estructural del concreto. La fibra de carbono representa una opción viable para el refuerzo de estructuras de concreto armado, gracias a la inalterabilidad de las características mecánicas de dichas fibras ante la presencia de humedad, disolventes, ácidos, agentes atmosféricos, etc., lo que hace que puedan operar en ambientes agresivos por grandes períodos de tiempo bajo carga permanente ya que su mantenimiento y reparación son muy fáciles.
- Una sección reforzada con el sistema FRP se comporta de la misma manera que una sección de

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

- ✚ concreto armado clásica; el compuesto se comporta como armadura exterior.
- ✚ Con respecto a las ventajas que poseen las Fibras de Carbono, la más importante sin duda es la gran resistencia que le otorgan a las estructuras, debido a las grandes capacidades mecánicas que poseen, en comparación con los métodos tradicionales de reforzamiento como son la rehabilitación con platinas y aumento de secciones de concreto armado.
- ✚ Otra ventaja es que las Fibras de Carbono poseen un bajo peso lo que disminuye considerablemente el área a reforzar o reparar, facilitan su instalación, no se corroen con el paso del tiempo y el éxito del reforzamiento con esta técnica no requiere de mano de obra muy especializada, sino que de materiales de alta tecnología y calidad.
- ✚ En cuanto a las desventajas de esta tecnología de refuerzo, persiste el costo relativamente mayor de estos materiales en comparación con las técnicas tradicionales de reforzamiento, la falta de normativa y el desconocimiento de la técnica en general. Esto ha contribuido a que exista cierta reserva del medio constructivo a incorporar esta tecnología, sin embargo, se estima que este costo bajará en los próximos años con motivo de la utilización masiva de productos compuestos de fibras de carbono, y a la alta competencia entre las empresas productoras.

10. Bibliografía

Bibliografía

- 440.2R, A. (2023). *Guía para el diseño y Construcción de sistemas FRP adheridos externamente para el refuerzo de estructuras de Hormigon*. Estados Unidos: Farmington Hills.
- Crespo, D. I. (2006). *DISEÑO Y TECNOLOGIA DE NUEVOS HORMIGONES*. Zaragoza, España.
- MACHADO, A. D. (2005). *Refuerzo de Estructuras de Concreto Armado con Fibras de Carbono*. Belo Horizonte, Brasil: PINI.
- Sistach, J. B. (2021). *La Fibra de Carbono en refuerzo de estructuras de Hormigon*. Barcelona: Omega S207.
- Tecnologías Mapei. (2020). *Sistemas de refuerzo de estructuras de edificación de hormigon armado*.

Normativa

ACI-440.2R, A. (2023). *Guía para el diseño y Construcción de sistemas FRP adheridos externamente para el refuerzo de estructuras de Hormigon*. Estados Unidos: Farmington Hills.

EN 1504. *Norma Europea. Productos y sistemas para la reparación y protección de estructuras de concreto*. Enero 2009.

Guide specifications for desing of bonded FRP Systems for repair and strengthening of concrete bridge elements. AASHTO. March 2023, Second Edition.

Investigación

Crespo, D. I. (2006). *DISEÑO Y TECNOLOGIA DE NUEVOS HORMIGONES*. Zaragoza, España

MACHADO, A. D. (2005). *Refuerzo de Estructuras de Concreto Armado con Fibras de Carbono*. Belo Horizonte, Brasil: PINI.

Sistach, J. B. (2021). *La Fibra de Carbono en refuerzo de estructuras de Hormigon*. Barcelona: Omega S207.

R. PEREA, F. VARONA. *diseño de laminados de material compuesto para refuerzo a flexion de estructuras de concreto armado mediante las recomendaciones europea*. 2007.

Caso de estudio: Aplicación de materiales compuestos a base de “FRP” para el reforzamiento de estructuras de concreto reforzado

Manuales

Tecnologías Mapei. (2020). *Sistemas de refuerzo de estructuras de edificación de hormigón armado*.

Master Builders. MBCC Group. MasterBrace. *Refuerzo estructural a base de materiales compuestos de fibra de carbono*. 2019.

SIKA SAU. *Sistema Sika CarboDur*. 2023.

Asociación Técnica de Carreteras. *Refuerzo con materiales compuestos en puentes de concreto armado*. Comité de Puentes. 2017.