

**Estudio de la efectividad del refuerzo a flexión o cortante con polímeros reforzados con  
fibra de carbono instalado en vigas existentes**

**Jairo Augusto Restrepo Badillo**

**Monografía para optar al título de Especialista en Estructuras**

**Director:**

**Luis Eduardo Zapata Orduz**

**Ph.D en Ingeniería Civil**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Especialización en Estructuras**

**Bucaramanga**

**2017**

### Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer a Dios, que me ha dado la capacidad, el conocimiento y la vida para poder disfrutar este momento. A mi bella esposa Silvia, que estando recién casados me brindó su apoyo incondicional para realizar esta especialización y que, con su infinito amor y su paciencia, hizo esta experiencia mucho más enriquecedora. Adicionalmente, agradecer a mis padres, quienes a lo largo de toda la vida me han formado y en parte me han ayudado a convertirme en la persona que soy y porque siempre me han apoyado. A ellos infinitas gracias y un infinito amor. De igual manera, agradecer a mis compañeros y amigos de especialización, con quienes compartí nuevos conocimientos, risas y muy buenos momentos; así como a todo el cuerpo docente y logístico de la UIS. A nuestros profesores por dedicarnos el tiempo y compartirnos todo su conocimiento y al grupo logístico por tener siempre todo listo y en orden para poder realizar nuestras jornadas de estudio. Finalmente, agradecer a mi director de monografía, el ingeniero Luis Eduardo Zapata Orduz, por la paciencia y el tiempo dedicado a este trabajo. Su guía y consejo fueron factores determinantes para realizarlo de manera correcta.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	16
1. Justificación .....	19
2. Objetivos .....	20
2.1 Objetivo general .....	20
2.2 Objetivos específicos: .....	20
3. Alcance .....	21
4. Marco Teórico .....	22
4.1 Historia y origen de las fibras de carbono .....	22
4.2 Características de los polímeros reforzados con fibra de carbono. ....	22
4.3 Proceso de pultrusión .....	23
4.4 Los polímeros reforzados con fibra en la construcción.....	24
4.5 Comportamiento a flexión y cortante del concreto reforzado con polímeros reforzados con fibra de carbono. ....	25
5. Refuerzo con CFRP a flexión en vigas .....	25
5.1 Refuerzo con método EBR y EBRIG .....	25
5.2 Configuración de los experimentos .....	26
5.2.1 Experimento número 1: Artículo “Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence” .....	27
5.2.1.1 Resultados .....	30

5.2.1.1.1 Modos de falla y cargas .....	30
5.2.1.1.2 Vigas probadas bajo carga concentrada .....	31
5.2.1.1.3 Vigas probadas bajo carga distribuida .....	31
5.2.1.1.4 Comportamiento experimental carga-deformación .....	32
5.2.1.2 Análisis de resultados .....	34
5.2.2 Experimento número 2: Artículo “Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams.” ....	35
5.2.2.1 Métodos de reforzamiento .....	36
5.2.2.2 Resultados .....	38
5.2.2.3 Efecto de la técnica de reforzamiento .....	42
5.2.2.4 Efecto del número de capas de CFRP .....	42
5.2.2.5 Modos de falla y patrones de fisuras .....	43
5.2.2.6 Análisis de resultados .....	43
5.2.3 Experimento número 3: Artículo “Experimental and analytical investigation of CFRP flexural and shear strengthening efficiencies of RC beams” .....	44
5.2.3.1 Configuraciones de refuerzo .....	45
5.2.3.2 Propiedades de los materiales .....	47
5.2.3.3 Instrumentación .....	47
5.2.3.4 Configuración del experimento y procedimiento de carga .....	49
5.2.3.5 Resultados experimentales .....	50
5.2.3.5.1 Observaciones de la prueba .....	50
5.2.3.5.2 Deflexiones .....	53
5.2.3.5.3 Las deformaciones por tensión en el acero a flexión y las hojas CFRP .....	54
5.2.3.5.4 Deformaciones del concreto .....	58

5.2.3.5.5 Deformaciones por tensión en los estribos de acero y los revestimientos en U de CFRP. ....	59
5.2.3.6 Análisis de resultados .....	63
5.2.4 Experimento número 4: Artículo “Experimental study of RC jacketed and CFRP strengthened RC beams” .....	65
5.2.4.1 Comportamiento de los materiales .....	68
5.2.4.2 Configuración de la prueba .....	69
5.2.4.3 Resultados .....	70
5.2.4.3.1 Especímenes de referencia .....	70
5.2.4.3.2 Vigas reforzadas con CFRP .....	72
5.2.4.3.3 Vigas encamisadas con concreto reforzado .....	75
5.2.4.4 Análisis de resultados .....	81
6. Refuerzo con CFRP a cortante en vigas. ....	82
6.1 Refuerzo a cortante con los métodos: dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa ..	82
6.2 Configuración de los experimentos .....	83
6.2.1 Experimento número 1: Artículo “Influence of different bonding and wrapping techniques on performance of beams strengthened in shear using CFRP reinforcement” .....	83
6.2.1.1 Aplicación de CFRP por procedimiento en seco .....	85
6.2.1.1.1 Especímenes reforzados con el método EBR .....	85
6.2.1.1.2 Especímenes reforzados con el método EBRIG .....	85
6.2.1.2 Clasificación de los especímenes .....	85
6.2.1.3 Comparación de resultados experimentales y discusión .....	89
6.2.1.3.1 Carga última .....	90
6.2.1.3.2 Curvas carga-desplazamiento y ductilidad .....	93

6.2.1.3.3 Mecanismo de falla .....	96
6.2.1.4 Análisis de resultados.....	99
6.2.2 Experimento número 2: Artículo “Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips” .....	100
6.2.2.1 Propiedades de los materiales .....	103
6.2.2.2 Preparación de los especímenes de prueba .....	105
6.2.2.2.1 Tamaño de espécimen y detalles del acero de refuerzo .....	105
6.2.2.2.2 Fase de tratamiento de superficie .....	105
6.2.2.3 Configuración y procedimiento de la prueba .....	107
6.2.2.4 Respuesta carga-deflexión y modo de falla.....	107
6.2.2.5 Análisis de resultados.....	112
7. Conclusiones Finales .....	113
Referencias Bibliográficas .....	116

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades de los diferentes materiales de refuerzo. ....	23
Tabla 2. Programa experimental. ....	29
Tabla 3. Modos de falla experimental y cargas de falla.....	31
Tabla 4. Detalles de los especímenes probados. ....	38
Tabla 5. Propiedades mecánicas del CFRP y adhesivo utilizados. ....	48

Tabla 6. Capacidades y modos de falla de las vigas. ....	53
Tabla 7. Propiedades geométricas de los especímenes. ....	66
Tabla 8. Propiedades mecánicas de los materiales. ....	69
Tabla 9. Detección de fallas en los experimentos. ....	79
Tabla 10. Evaluación de las técnicas de reforzamiento. ....	80
Tabla 11. Resultados analíticos vs Resultados de experimentos. ....	80
Tabla 12. Especificaciones de los especímenes. ....	89
Tabla 13. Resumen de resultados. ....	91
Tabla 14. Detalles de las vigas. ....	102
Tabla 15. Nomenclatura usada y detalles de los especímenes probados. ....	102
Tabla 16. Relación de diseño de cortante sobre fuerza a flexión. ....	103
Tabla 17. Material y propiedades geométricas de los especímenes. ....	104
Tabla 18. Resumen de las cargas últimas experimentales observadas. ....	109

### **Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Formas de distribución para las tiras de CFRP a cortante .....	17
Figura 2. Tipos de instalación según la preparación de la superficie. ....	17
Figura 3. Esquema del proceso de pultrusión. ....	24
Figura 4. Sistemas de carga concentrada y distribuida. ....	27
Figura 5. Sección transversal de la viga. ....	29

Figura 6. Sección longitudinal de la viga.....	30
Figura 7. Localización de extensómetros.....	30
Figura 8. Curvas carga deflexión.....	33
Figura 9. a – Distribución experimental de las deformaciones, vigas EBR bajo carga distribuida.....	33
Figura 10. Geometría de las vigas.....	36
Figura 11. Carga (kN) vs deflexión (mm) a mitad de la luz en vigas de referencia.....	40
Figura 12. Carga (kN) vs deflexión (mm) a mitad de la luz en vigas WSP-1L, EBR-1L y EBRIG-1L (1 capa de FRP).....	41
Figura 13. Carga (kN) vs deflexión (mm) a mitad de la luz en vigas WSP-2L, EBR-2L y EBRIG-2L (2 capas de FRP).....	41
Figura 14. Carga (kN) vs deflexión (mm) a mitad de la luz en vigas WSP-3L, EBR-3L y EBRIG-3L (3 capas de FRP).....	41
Figura 15. Comparación de carga ultima entre vigas WSP, EBR y EBRIG.....	42
Figura 16. a – Vista de perfil vigas.....	46
Figura 17. Esquemas de refuerzo y localización de los extensómetros en las hojas CFRP.....	48
Figura 18. Medidas de deflexión y deformación del concreto.....	49
Figura 19. Patrones de fisuras de las vigas probadas a la falla.....	52
Figura 20. Acercamiento a las fallas de todas las vigas reforzadas.....	52
Figura 21. Carga (kN) vs Deflexión (mm) en el centro de la viga.....	54
Figura 22. Respuestas de deformación del acero de tensión de todas las vigas ensayadas.....	57
Figura 23. Respuestas de deformación en el centro de las láminas CFRP a flexión.....	57
Figura 24. Comparación entre las respuestas de deformación por tracción del acero de flexión y los CFRP.....	57

Figura 25. Comparación de los perfiles de deformación por tracción de los CFRP a flexión a diferentes niveles de carga. ....	58
Figura 26. Carga vs Deformación del concreto, respuestas de todas las vigas. ....	60
Figura 27. Carga vs Curvas de deformación en los estribos en la posición S2 y S5 de todas las vigas reforzadas. ....	62
Figura 28. Carga vs Curvas de deformación en los revestimientos en U en la posición SC3 y SC8 de las vigas reforzadas a cortante. ....	63
Figura 29. Dimensiones y configuración del refuerzo en las vigas. ....	68
Figura 30. Carga de 3 puntos. ....	70
Figura 31. Patrón de propagación de fisuras en las vigas de referencia.....	71
Figura 32. Carga (kN) vs Deflexión (mm) en vigas de referencia.....	72
Figura 33 (a) Formación de micro fisuras en el centro, (b) Propagación de las fisuras hacia los apoyos, (c) Ruptura de revestimiento en U del final, (d) Falla por desprendimiento del CFRP ...	74
Figura 34. Patrón de propagación de fisuras en las vigas reforzadas con CFRP .....	74
Figura 35. Comportamiento Carga-Deflexión de las vigas reforzadas con CFRP.....	75
Figura 36. Patrón de propagación de fisuras observado en las vigas encamisadas.....	77
Figura 37. Formación de fisuras en la parte central de la viga inicial que fue encamisada. ....	77
Figura 38. Comportamiento Carga-Deflexión de las vigas encamisadas.....	78
Figura 39. Configuración de la configuración de prueba y detalles del refuerzo. (a) compuestos de CFRP; (b) refuerzo de acero a compresión; (c) sistema combinado de anclaje; (d) separador de barras de acero; (e) Sistema de anclaje externo; (f) sistema de transferencia de carga; (g) soportes; (h) armadura de acero a tracción; (i) LVDT; (j) sección transversal de la viga. ....	87
Figura 40. Configuración de diferentes métodos de fortalecimiento; (a-sección A) EBR-V; (a-sección B) EBRIG-V; (b-sección A) EBR-D; (b-sección B) EBRIG-D. ....	88

Figura 41. Efectos de diferentes métodos de refuerzo y fijación de CFRP en diferentes grupos sobre la capacidad de carga de las vigas ensayadas. ....	92
Figura 42. Efectos de diferentes métodos de refuerzo y fijación de CFRP en diferentes grupos sobre la absorción de energía de las vigas ensayadas. ....	94
Figura 43. Curvas de Carga (kN) vs Deflexión (mm) de las vigas en el grupo A. ....	94
Figura 44. Curvas de Carga (kN) vs Deflexión (mm) de las vigas en el grupo B. ....	95
Figura 45. Curvas de Carga (kN) vs Deflexión (mm) de las vigas en el grupo C. ....	95
Figura 46. Modo de falla de la viga control sin refuerzo de CFRP.....	97
Figura 47. Modo de fallo de los especímenes del grupo A reforzados con diferentes métodos; (A) EBR-V; (B) EBRIG-V; (C) EBR-D; (D) EBRIG-D. ....	98
Figura 48. Modo de fallo de los especímenes del grupo B reforzados con diferentes métodos; (A) EBR-V; (B) EBRIG-V; (C) EBR-D; (D) EBRIG-D. ....	98
Figura 49. Modo de fallo de los especímenes del grupo C reforzados con diferentes métodos; (A) EBR-V; (B) EBRIG-V; (C) EBR-D; (D) EBRIG-D. ....	99
Figura 50. Sección transversal de los especímenes. ....	101
Figura 51. Diagrama esquemático del espécimen reforzado usando tiras verticales de CFRP ...	101
Figura 52. Diagrama esquemático del espécimen reforzado usando tiras inclinadas de CFRP...	102
Figura 53. Armadura de refuerzo y formaleta utilizada en la preparación de las vigas de concreto reforzado deficientes a cortante.....	105
Figura 54. Vigas reforzadas con tiras de CFRP vertical e inclinado.....	106
Figura 55. Curvas carga (kN) vs deflexión (mm) de las vigas de control y las vigas con tiras CFRP verticales.....	110
Figura 56. Curvas carga (kN) vs deflexión (mm) de las vigas de control y las vigas con tiras CFRP inclinadas.....	110

Figura 57. Falla a cortante de la viga de control. ....	111
Figura 58. Falla de la viga reforzada con CFRP vertical. ....	111
Figura 59. Falla de la viga reforzada con CFRP inclinado. ....	112

## Resumen

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LA EFECTIVIDAD DEL REFUERZO A FLEXIÓN O CORTANTE CON POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO INSTALADO EN VIGAS EXISTENTES\*

**AUTOR:** JAIRO AUGUSTO RESTREPO BADILLO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** POLIMEROS, CFRP, REHABILITACIÓN, REFUERZO, FIBRA, CARBONO

**DESCRIPCIÓN:** Mediante el presente trabajo se pretende evaluar la efectividad, las ventajas y las desventajas del refuerzo estructural con polímeros reforzados con fibras de carbono – carbon fiber reinforced polymer (CFRP, por sus siglas en inglés) como material de refuerzo, a flexión y/o cortante, en elementos ya existentes, en el caso particular de las vigas de concreto reforzado. Y en segunda instancia se quiere resaltar la importancia de la rehabilitación estructural utilizando CFRP en la ingeniería civil.

Este trabajo consta de dos partes principales. La primera, es la recopilación y el análisis de los resultados obtenidos en experimentos e investigaciones previas, realizadas y documentadas por diversas fuentes académicas, en las que se revisa el comportamiento de las vigas a flexión y/o cortante, antes y después de aplicado el refuerzo con CFRP, teniendo en cuenta parámetros como la ductilidad, la propagación de las grietas, el tipo de falla y la carga máxima que es capaz de soportar y una segunda parte en la que se realiza un análisis comparativo de resistencia al cortante, resistencia a flexión y carga última, entre la rehabilitación de vigas con encamisado de concreto reforzado y la rehabilitación de vigas con CFRP. Con base en los resultados de las investigaciones y experimentos previamente mencionados. Al final, se emiten una serie de conclusiones y recomendaciones que pretenden ayudar en la toma de una decisión en cuanto a los materiales a utilizar para llevar a cabo la rehabilitación estructural de elementos en concreto reforzado.

---

\* Monografía

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Ph.D

### Abstract

**TITLE:** STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF FLEXURAL OR SHEAR REINFORCEMENT WITH POLYMERS REINFORCED WITH CARBON FIBER INSTALLED IN EXISTING BEAMS\*.

**AUTHOR:** JAIRO AUGUSTO RESTREPO BADILLO\*\*

**KEYWORDS:** POLYMERS, CFRP, STRENGTHENING, REINFORCEMENT, FIBER, CARBON

**DESCRIPTION:** The present work intends to evaluate the effectiveness, the advantages and the disadvantages of the structural reinforcement with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) as flexural and / or shear reinforcement, in existing elements, in the particular case of reinforced concrete beams. And secondly, to highlight the importance of structural rehabilitation using CFRP in civil engineering.

This work has two main parts. The first one is the compilation and analysis of the results obtained in experiments and previous investigations, carried out and documented by different academic sources, in which the flexural and/or shear behavior of the beams, before and after the application of the Reinforcement with CFRP is reviewed, taking into account parameters such as ductility, crack propagation, the type of failure and the maximum load it is able to withstand and a second part in which a comparative analysis of shear strength, flexural resistance and ultimate load, between the rehabilitation of beams with reinforced concrete jacketing and the rehabilitation of beams using CFRP is made. Based on the results of the investigations and experiments previously mentioned. In the end, a series of conclusions and recommendations are sent out, which are intended to assist in making a decision on the materials to be used to carry out the structural rehabilitation of reinforced concrete elements.

---

\* Monograph

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Specialization in Structures Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Ph.D

## Introducción

El deterioro del concreto es un problema muy común. Se dice que un concreto ha sufrido deterioro cuando se han afectado sus propiedades mecánicas, físicas o químicas tanto en un nivel superficial como en su interior. La sobrecarga vertical, consecuencia del aumento de las cargas de servicio o el cambio de uso de las estructuras, es una de las causas más comunes de deterioro de una estructura de concreto y si no se les presta atención a los primeros síntomas, puede terminar en un problema mayor. Si se analiza la situación económica y ambiental actual, es más viable rehabilitar una estructura que demolerla y hacer una nueva (Aldahdooh, Bunnori, Johari, Jamrah, & Alnuaimi, 2016). Es por esto que la investigación de nuevos y mejores materiales se ha vuelto tan importante. En este documento se examinará el refuerzo de vigas de concreto a flexión y cortante, utilizando CFRP.

Las tiras (strips/sheets, en inglés) o láminas (laminates, en inglés) de CFRP son los materiales comúnmente utilizados para reforzar miembros de concreto debido a su excelente relación carga máxima-peso, a su fuerza mecánica y a sus buenas propiedades de fatiga (Osman, Wu, Ji, & Abdulhameed, 2016). Adicionalmente, se observa que algunos experimentos se han llevado a cabo, tanto en vigas reales como a nivel de cálculos con elementos finitos, que con sus resultados confirman una sobresaliente mejoría con el uso de las láminas de CFRP (Osman et al, 2016).

Para refuerzo de cortante se observaron los resultados de las tres formas de distribución para las tiras de CFRP: dos lados (Figura 1a), en forma de U (Figura 1b) y de vuelta completa (Figura 1c), como también se analizaron dos diferentes formas de instalación (Figura 2): refuerzo adjunto externo (Externally bonded reinforcement, EBR, por sus siglas en inglés) y refuerzo adjunto

externo con hendidura (Externally bonded reinforcement in grooves, EBRIG, por sus siglas en inglés). Y por último la incidencia de la instalación en forma diagonal o vertical. La investigación concluyó la superioridad de la combinación de vuelta completa con EBRIG (Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016).

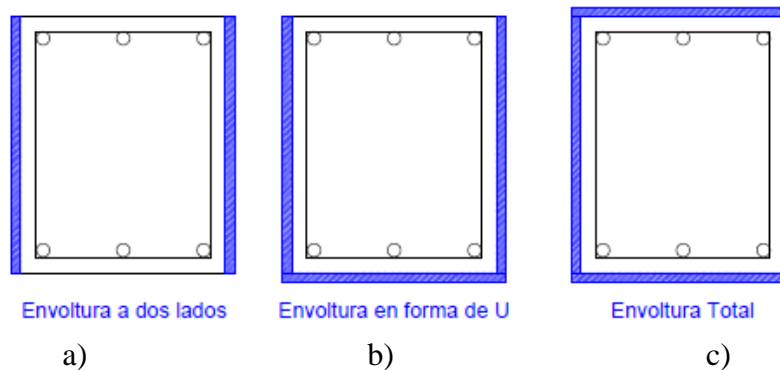


Figura 1. Formas de distribución para las tiras de CFRP a cortante  
Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

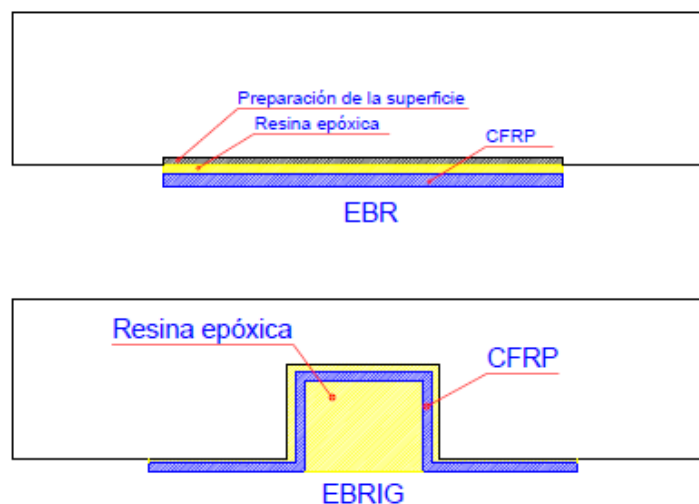


Figura 2. Tipos de instalación según la preparación de la superficie  
Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

Con el fin de ampliar el entendimiento sobre el comportamiento del cortante y la interacción entre concreto, estribos de acero internos y refuerzo CFRP, y de tratar de dar solución al problema principal de este tipo de refuerzo, que es el desprendimiento, se realizó un estudio sobre vigas T reforzadas a cortante con CFRP en forma de U, donde se introdujo un nuevo concepto de anclajes no mecánicos para ayudar a evitar el desprendimiento de las tiras de CFRP (Chen, Zhang, Li, Li, & Zhou, 2016). Esta investigación concluyó que los anclajes, retardaban y en otros casos eliminaban por completo la falla por desprendimiento del CFRP.

Para refuerzo a flexión se estudiaron experimentos donde se ilustran las metodologías más utilizadas para realizar refuerzo a flexión con CFRP; las cuales son: EBR y EBRIG. Las diferentes configuraciones estudiadas confirmaron que el refuerzo mediante CFRP mejora hasta en un doscientos por ciento (200%), la resistencia a flexión y las capacidades de carga máxima de las vigas intervenidas (Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015) y (Mostofinejad & Shameli, 2013).

Finalmente, con la intención de comparar el reforzamiento a flexión con CFRP utilizando el método EBR y el encamisado de concreto reforzado, en vigas de concreto reforzado. Se revisó el trabajo realizado por (Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015) en el cual se realizó una detallada explicación de la aplicación de las dos metodologías, sus ventajas y sus falencias. Y en el que también, a través de tablas, se compararon los resultados obtenidos como tipo de falla, momento máximo, máxima deflexión y momento último.

## 1. Justificación

- Debido a los constantes cambios en las normativas sismo resistentes, así como el incremento de las cargas de servicio en las estructuras de concreto y a los constantes y diversos fenómenos naturales que atacan las estructuras, el reforzamiento estructural es un campo muy importante de la ingeniería civil y durante muchos años, esta parte de la ingeniería ha impulsado la investigación de nuevos materiales, con el fin de facilitar las labores relacionadas con la rehabilitación estructural.

- Debido a la antigüedad de muchas construcciones y al cambio de uso residencial a comercial de muchas edificaciones, se hace indispensable conocer sobre la nueva tendencia en materiales para el reforzamiento estructural, debido a que tarde o temprano varias de las edificaciones existentes van a necesitar una intervención estructural, abriendo un importante campo de actividad profesional.

- El refuerzo con CFRP es una alternativa rápida y versátil para la rehabilitación estructural y garantiza una invasión mínima en la estructura para su utilización. Aunque esta técnica ya es de probada eficiencia a nivel mundial, en Colombia su uso apenas es incipiente, y hace falta una mayor socialización para que en el país, los ingenieros cuenten con diversas alternativas para realizar las labores de recuperación de las estructuras y al mismo tiempo realizar una importante contribución a la sostenibilidad ambiental.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Estudiar la efectividad y validez de los polímeros reforzados con fibras de carbono en ausencia de anclajes mecánicos, como método de reforzamiento a flexión y cortante para vigas de concreto reforzado, a partir de la evidencia reportada en la literatura científica internacional.

### 2.2 Objetivos específicos:

- Comparar los resultados de investigaciones previas de resistencia a flexión de las vigas de concreto reforzado, antes y después de la instalación de refuerzo con CFRP, con dos diferentes metodologías: Refuerzo de vinculación externo (EBR) y refuerzo de vinculación externo con hendidura (EBRIG). Sin el uso de anclajes mecánicos.
- Contrastar los resultados de investigaciones previas de resistencia al corte de las vigas de concreto reforzado, antes y después de la instalación de refuerzo con polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP), con tres diferentes metodologías: Dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa.
- Comparar los resultados del tipo de falla, deflexiones y/o deformaciones, de una viga de concreto reforzado rehabilitada con CFRP a flexión con la técnica EBR, con los resultados de una

viga de concreto reforzado rehabilitada con encamisado de concreto reforzado y reportar cual técnica ofrece mejores porcentajes de mejora.

- Confrontar los resultados de resistencia a cortante y flexión que se han obtenido en prácticas de laboratorio realizadas a las vigas de control (sin CFRP), con los resultados obtenidos de las vigas a las que se les aplicó refuerzo con CFRP.

### **3. Alcance**

- La información para la investigación propuesta será obtenida únicamente de documentos de estudios y ensayos anteriores que se encuentran en las diferentes bases de datos científicas.
- En el presente proyecto únicamente se tendrán en cuenta las pruebas de laboratorio realizadas en vigas de concreto reforzado en las que se haya utilizado CFRP como método de reforzamiento adicional.
- Para el estudio a cortante se van a comparar las siguientes tres metodologías: Dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa.
- Para el estudio a flexión se van a tener en cuenta las dos metodologías: Refuerzo de vinculación externo (EBR) y Refuerzo de vinculación externo con hendidura (EBRIG). Sin el uso de anclajes mecánicos.

## 4. Marco Teórico

### 4.1 Historia y origen de las fibras de carbono

Las primeras fibras de carbono utilizadas industrialmente, se deben a Thomas Alva Edison, el cual preparó fibras por carbonización de filamentos de fibras de bambú (celulosa) y fueron utilizadas en la preparación de filamentos para lámparas incandescentes, alrededor de 1880 (Morgan, 2005).

A lo largo de casi un siglo se continuó el desarrollo de las fibras, pero fue en 1958 cuando Roger Bacon, investigador de “Union Carbide”, demostró la alta resistencia a la tracción de las fibras de carbono (Morgan, 2005). Con posterioridad, habría que esperar hasta el año 1960, en el que la empresa “Union Carbide” desarrolló un procedimiento industrial de obtención de fibras continuas de carbono de alto módulo de Young a partir de fibras de rayón.

### 4.2 Características de los polímeros reforzados con fibra de carbono.

Los CFRP se distinguen por su extremadamente alta resistencia y rigidez, baja densidad, excelentes propiedades de amortiguamiento y una alta resistencia al impacto. En cuanto a las láminas de CFRP, estas son básicamente láminas de polímero reforzado con fibras de carbono sobre una matriz de resina epóxica, fabricadas mediante proceso de pultrusión, diseñadas para reforzamiento de estructuras de concreto (SIKA, 2015). Algunas de las características de los CFRP se pueden obtener de (ACI, 2006) en la Tabla 1:

Tabla 1.

*Propiedades de los diferentes materiales de refuerzo.*

	<b>Acero</b>	<b>GFRP</b>	<b>CFRP</b>	<b>AFRP</b>
Rendimiento Nominal a Tensión (MPa)	276 a 517	N/A	N/A	N/A
Resistencia a tracción (MPa)	483 a 690	483 a 1600	600 a 3690	1720 a 2540
Módulo elástico x 10 <sup>3</sup> (GPa)	200	35 a 51	120 a 580	41 a 125
Rendimiento a tensión, %	0.14 a 0.25	N/A	N/A	N/A
Tensión de rotura, %	6 a 12	1.2 a 3.1	0.5 a 1.7	1.9 a 4.4

Nota: Adaptado de ACI, 2006

### 4.3 Proceso de pultrusión

La pultrusión es una de las técnicas de fabricación más rentables para producir materiales compuestos reforzados con fibra, con secciones transversales constantes. En la figura 3 se puede observar un esquema del proceso de pultrusión. El refuerzo que más se utiliza en este proceso es la fibra de vidrio; sin embargo, también se puede usar fibra de carbono, aramida o una mezcla de estos elementos. El material de refuerzo se tira y se guía a través de un sistema de impregnación de resina, que puede ser tanto un baño de resina abierto como una cámara de inyección de resina. El refuerzo de fibra se humedece completamente de tal manera que todas las fibras resulten saturadas en la resina. Los refuerzos y la resina pasan a través de una matriz calentada una vez que la resina impregna el material de refuerzo. Dentro de la matriz calentada, el estado de la resina cambia gradualmente de líquido a sólido debido a la reacción exotérmica de la resina termoendurecible. El producto curado y solidificado se tira a través de un mecanismo de tracción, y al final del proceso se corta a la longitud deseada (Cem C. Tutum, 2015).

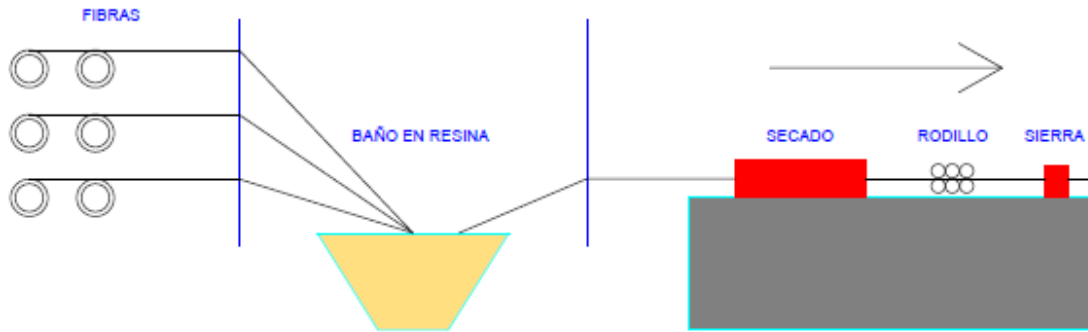


Figura 3. Esquema del proceso de pultrusión.

Nota: Adaptado de Cem C. Tutum, 2015

#### 4.4 Los polímeros reforzados con fibra en la construcción

En la construcción, la utilización de los polímeros reforzados con fibra (FRP por sus siglas en inglés) es muy reciente, y esto se debe a que anteriormente dichos materiales eran muy costosos y no resultaba práctico utilizarlos ya que incrementaban considerablemente el precio de los proyectos. A mediados de los años 90, gracias a la demanda y al mejoramiento de los procesos de fabricación, estos costos han ido disminuyendo y debido a esto, la utilización de los FRP en proyectos de construcción ha venido en aumento desde entonces (Correia, 2013).

Los materiales FRP en la construcción son utilizados principalmente de cuatro maneras; para el refuerzo interno en concreto reforzado, para el refuerzo externo en concreto reforzado, para hacer estructuras híbridas o tipo sándwich y para hacer estructuras completas (Correia, 2013). En Colombia, la distribución de estos materiales para la construcción está en cabeza de la empresa SIKA®, y por el momento su presentación principal es en láminas, que se usan para hacer refuerzo externo a flexión y cortante en vigas y columnas.

#### **4.5 Comportamiento a flexión y cortante del concreto reforzado con polímeros reforzados con fibra de carbono.**

Sin importar la configuración del elemento, se presentan dos posibles fallas a flexión: cuando hay poco refuerzo, los FRP fallan por ruptura a tensión, y cuando hay suficiente refuerzo, estos fallan por rompimiento en las zonas de compresión del concreto. Siendo la última falla mencionada la que se busca que ocurra primero debido a que es un proceso progresivo a diferencia de la falla por ruptura a tensión que es súbita (Bakis, y otros, 2002). En cuanto al comportamiento a cortante de vigas reforzadas con CFRP, también se tienen dos posibles fallas: por ruptura en los puntos de mayor deformación o por ruptura en la zona de confinamiento por fuerzas de corte-compresión (Bakis, y otros, 2002).

### **5. Refuerzo con CFRP a flexión en vigas**

#### **5.1 Refuerzo con método EBR y EBRIG**

Numerosos experimentos han demostrado que la resistencia a la tracción de los materiales reforzados con fibra puede ser aprovechada de forma excelente (Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015). Las principales técnicas utilizadas son las de vinculación externa (EB, por sus siglas en inglés); EBR y EBRIG. Según (Ismail M.I. Qeshta, 2016) y (Mohammadali Rezazadeh, 2016) en la técnica EBR, el refuerzo se aplica uniando los materiales de refuerzo a la superficie de tensión de la viga empleando un adhesivo fuerte. En la técnica EBRIG se incrustan los materiales de

refuerzo con el adhesivo dentro de ranuras o cortes hechos previamente en la cubierta del concreto. Es muy importante tener en cuenta, tal y como menciona (Mostofinejad & Shameli, 2013) que se debe hacer una buena preparación de la superficie del concreto, ya que se debe quitar la contaminación y las capas débiles de la superficie para mejorar la adherencia. El objetivo principal al utilizar cualquier sistema de refuerzo es conseguir una mejora en la rigidez y la resistencia de la viga, con un comportamiento dúctil satisfactorio. Sin embargo, el rendimiento de este refuerzo está determinado por una serie de factores, tales como la fuerza de la unión entre el material y el concreto y las características del propio material. Sin embargo, cualquiera que sea la técnica utilizada, se ha demostrado que la falla que más se repite, es la del desprendimiento de las láminas u hojas de CFRP, con un mejor rendimiento bajo la técnica EBRIG (Mostofinejad & Shameli, 2013).

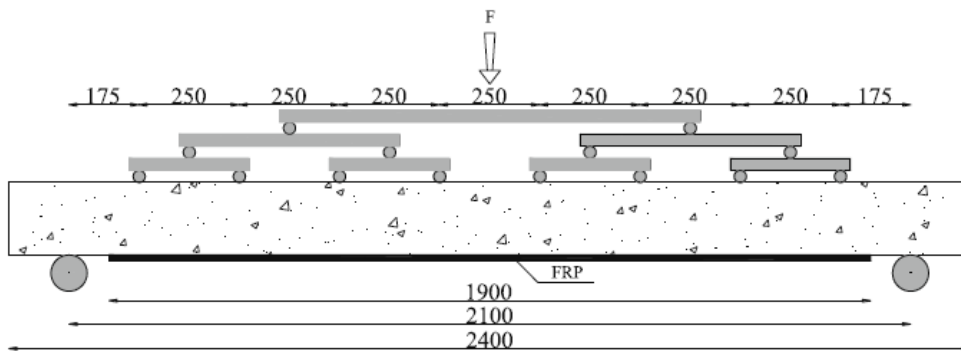
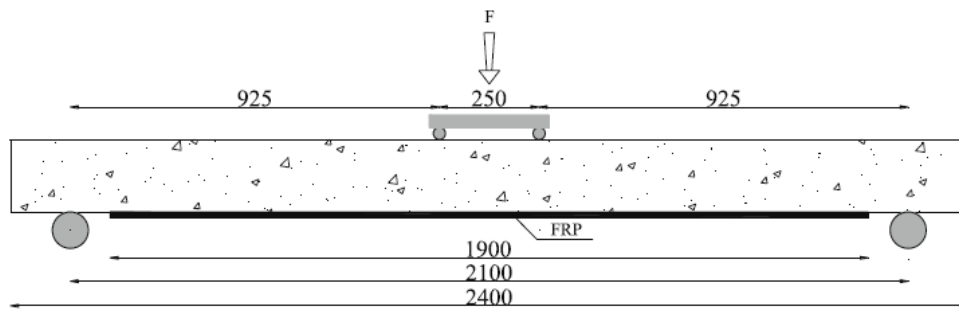
De igual manera en (Mostofinejad & Shameli, 2013) se indica que además de las capas longitudinales, se puede combinar el refuerzo longitudinal con el refuerzo transversal con revestimiento en U para reducir de forma significativa las deflexiones en la viga y aumentar la capacidad de carga final de la misma. Además, se reportó que la presencia de refuerzo transversal a lo largo de la luz, elimina o disminuye hasta en un 80% la posible ruptura del refuerzo longitudinal.

## **5.2 Configuración de los experimentos**

Para poder realizar un análisis sobre las ventajas y las desventajas de utilizar refuerzo a flexión y/o cortante de CFRP, se estudiaron algunos artículos que se relacionan a continuación:

**5.2.1 Experimento número 1: Artículo “Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence”** (Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015), *Composite Structures* 124 (páginas 163-175). Se ensayaron un total de 6 vigas de concreto reforzado, simplemente apoyadas con una luz de 2.1 metros, la carga se aplicó de dos maneras diferentes:

- A. Esquema de flexión de cuatro puntos (figura 4a) con 2 fuerzas a una distancia de 250 mm a través del tramo medio, denominado sistema de carga concentrado.
- B. Un patrón de carga distribuido (figura 4b) realizado con 8 puntos de carga espaciados cada 250 mm a lo largo del eje de la viga.



*Figura 4.* Sistemas de carga concentrada y distribuida.

Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015

Todas las vigas tenían una sección transversal rectangular con una altura de 160 mm y ancho de 120 mm, refuerzo interno de acero ( $2 \Phi 10$ ,  $A_s = 1,57 \text{ mm}^2$ ), estribos de acero (diámetro de 6 mm) espaciados a 200 mm. El recubrimiento del concreto fue de 45 mm para el refuerzo de acero inferior y 30 mm para el refuerzo superior, medido desde el centroide de las barras. La resistencia media a la compresión del concreto es de 21 MPa. Las barras de acero tienen una resistencia a la flexión media de 540 MPa y una resistencia a la tracción final de 590 MPa. Los CFRP que se utilizaron tenían espesor de 1,4 mm, módulo de Young de 171 GPa, resistencia a la tracción de 2052 MPa y esfuerzo máximo de 0,012.

Para el ensayo de EBR se pegó una placa de 40 mm en la parte inferior de la viga (figura 5), después de limpiar la superficie con aire comprimido y aplicar una capa de imprimación. Para todas las vigas reforzadas, el refuerzo de FRP se aplicó a una distancia de 100 mm de ambos soportes (figura 6). Se ensayaron dos vigas no reforzadas como muestras de referencia bajo ambas condiciones de carga. La tabla 2 muestra el programa experimental. Los especímenes se identificaron a lo largo de este documento usando la etiqueta R\_L\_N x T x W\_n, donde:

- R indica el tipo de refuerzo (Ref para viga de referencia sin refuerzo)
- L indica el tipo de carga (c = concentrada y d = distribuida)
- N es el número de tiras si tiene más de 1
- T es el espesor de las tiras o del laminado (1,4 mm)
- W es la anchura de las tiras o del laminado (10 ó 40 mm)
- n es el número cardinal de prueba para distinguir diferentes pruebas en muestras similares.

Tabla 2.

*Programa experimental.*

ID del espécimen	Tipo de CFRP	Área CFRP [mm <sup>2</sup> ]	Patrón de carga
Ref_c_no_1	No	-	Concentrada
Ref_d_no_1	No	-	Distribuida
EBR_c_1.4 x 40_1	EBR	56	Concentrada
EBR_c_1.4 x 40_2	EBR	56	Concentrada
EBR_d_1.4 x 40_1	EBR	56	Distribuida
EBR_d_1.4 x 40_2	EBR	56	Distribuida

Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, &amp; Pecce, 2015

Una viga no reforzada, 1 viga reforzadas con 1 placa EBR y 1 viga reforzada con 2 placas EBR fueron cargadas hasta la falla bajo las cargas concentradas. Las mismas pruebas también se realizaron con el patrón de carga distribuida (6 vigas en total). La carga se aplicó a través de una máquina de ensayo universal con control de desplazamiento (0,05 mm / s). La deflexión en el centro de la luz se midió mediante un transductor vertical de desplazamiento variable lineal. Nueve extensómetros fueron pegados en la parte inferior del refuerzo EBR como se puede ver en la figura 7. Las pruebas en las vigas sin refuerzo se detuvieron después de la fluencia del acero y cuando la tensión máxima en el concreto comprimido alcanzó aproximadamente el valor de 0,004.

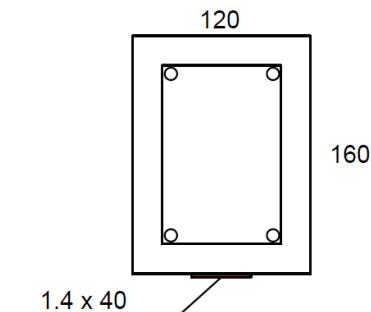


Figura 5. Sección transversal de la viga.

Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, &amp; Pecce, 2015

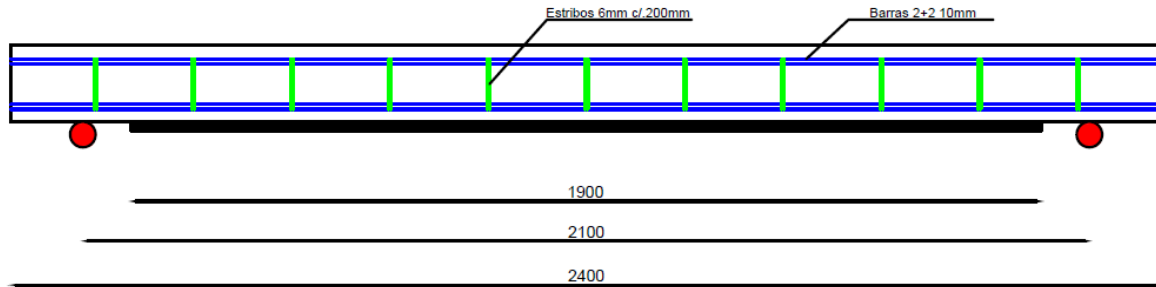


Figura 6. Sección longitudinal de la viga.

Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015

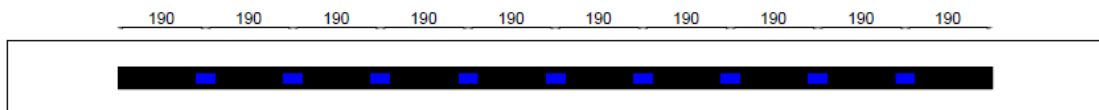


Figura 7. Localización de extensómetros.

Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015

### 5.2.1.1 Resultados

5.2.1.1.1 *Modos de falla y cargas.* En la tabla 3, la carga experimental máxima,  $F_{max,exp}$ , de cada muestra es registrada. Para vigas iguales, el promedio de la carga máxima experimental,  $F_{max,exp,m}$ , también aparece en la lista. Además, el aumento de la carga media,  $\Delta F_{max,exp,m}$ , alcanzado en el vigas reforzadas con respecto a la viga de referencia no reforzada igualmente cargado, también se informa. Los diferentes modos de falla observados durante las pruebas también se enumeran e identifican en la tabla 3.

5.2.1.1.2 *Vigas probadas bajo carga concentrada.* Con respecto a la carga alcanzada por las vigas reforzadas en el esquema de carga de cuatro puntos (dos fuerzas concentradas), el incremento con respecto a la viga de referencia es relevante para todos los tipos de refuerzo. En particular, se consiguieron los valores más altos para las dos vigas con la placa EBR (+ 75% y + 81%).

Tabla 3.

*Modos de falla experimental y cargas de falla.*

ID del espécimen	Tipo de falla	Fmax, exp [kN]	Fmax, exp, m [kN]	$\Delta F_{max, exp, m}$	$\eta_{exp}$ [kN]
Ref_c_no_1	CC +SY	20.1	20.1	-	2.3
Ref_d_no_1	CC +SY	46.1	46.1	-	
EBR_c_1.4 x 40_1	ED - ID	36.5	35.8	+81%	2
EBR_c_1.4 x 40_2	CDCD - CCS	35.2		+75%	
EBR_d_1.4 x 40_1	ED - CCS	75.1	70	+63%	
EBR_d_1.4 x 40_2	ED	64.8		+40%	

\* **CC**= Falla compresión del concreto, **SY**= Fluencia del acero, **SH**= Falla a cortante \* **ED**= Desprendimiento al extremo, **ID**= Desprendimiento intermedio, **CDCD**= Desprendimiento por fisura diagonal crítica, **CS**= Separación del recubrimiento del concreto

Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015

Con respecto al modo de falla, la viga no reforzada falló por la trituración del concreto (CC) después de la fluencia del acero (SY). Las dos vigas reforzadas con la placa EBR y cargadas bajo fuerzas concentradas alcanzaron aproximadamente la misma carga máxima, aunque con modos de falla ligeramente diferentes. De hecho, la primera viga falló por desprendimiento simultáneo de la placa de FRP en el área central (ICD) y en el extremo derecho (ED), mientras que en la segunda viga solo sucedió el desprendimiento en el extremo (ED).

5.2.1.1.3 *Vigas probadas bajo carga distribuida.* La tabla 3 muestra que las cargas máximas de falla en el caso de fuerzas distribuidas son mayores que las registradas en el caso de dos fuerzas

como se esperaba debido a los diferentes patrones de carga. Basándose en las ubicaciones de las fuerzas concentradas (ver figura 4 a y b), no todas las ocho fuerzas igualmente espaciadas contribuyen a representar una carga distribuida uniforme para una viga "Bernoulli". En particular, la distancia de la fuerza más externa hasta el apoyo es de 175 mm (véase la figura 4b), mientras que la altura efectiva de la viga es de 115 mm.

Respecto a los modos de falla, para las vigas con EBR probadas bajo las cargas distribuidas sólo se produjo desprendimiento al extremo (ED). En particular, para la primera viga, el ED ocurrió simultáneamente con la eliminación de la cubierta de concreto (CCS), mientras que el fallo de la segunda fue simplemente debido a ED que ocurrió a una carga menor que la primera (64,8 kN frente a 75,1 kN). La aparición de ED para tales vigas fue probablemente debido al esquema de carga como se esperaba: el cortante alcanzado al final en la viga es, de hecho, mayor que el alcanzado en las vigas ensayadas bajo las dos fuerzas teniendo el mismo momento de flexión a la mitad de la luz.

*5.2.1.1.4 Comportamiento experimental carga-deformación.* En la figura 8, las curvas de carga-deflexión se trazan para las vigas no reforzadas y las vigas EBR probadas bajo carga, tanto concentrada como distribuida. La comparación muestra claramente que tanto la resistencia como la rigidez aumentan cuando se aplica la placa de CFRP con la técnica EBR en comparación con la viga de referencia, bajo ambos patrones de carga. Los gráficos de carga-deflexión también muestran que el refuerzo con EBR permite un aumento de la carga que soporta el acero del interior con respecto a la viga de referencia sin reforzar. En particular, para las vigas reforzadas con la placa EBR y cargadas con fuerzas concentradas, la fluencia del acero parece producirse antes del fallo por separación, mientras que, para las vigas ensayadas bajo el esquema de carga distribuida,

la fluencia del acero no es evidente porque es muy probable que se produzca al mismo tiempo que la separación (figura 11a y figura 11b).

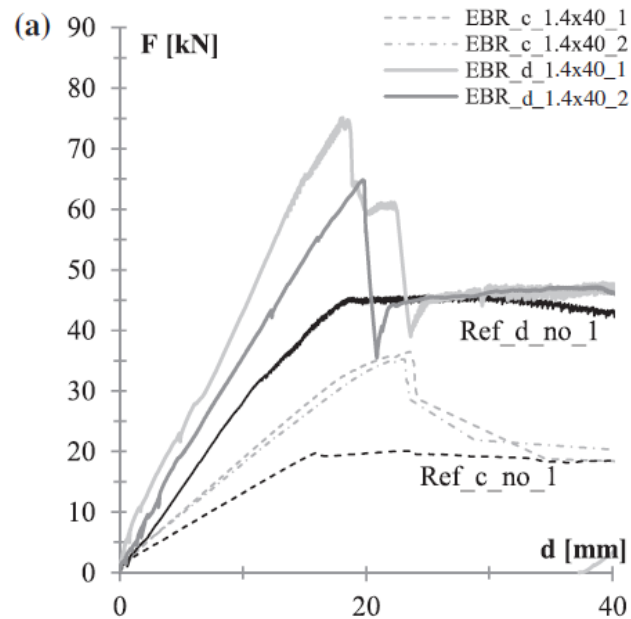


Figura 8. Curvas carga deflexión.

Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015

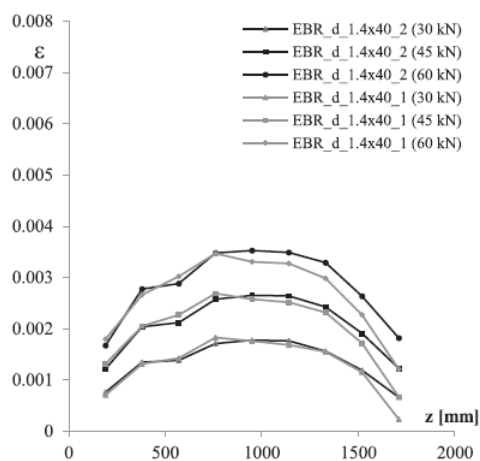


Figura 9. a – Distribución experimental de las deformaciones, vigas EBR bajo carga distribuida.

Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015

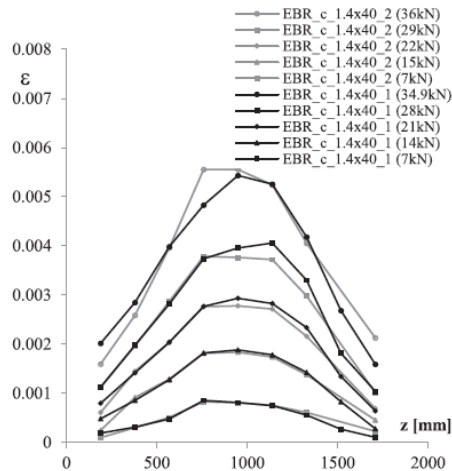


Figura 9. b – Distribución experimental de las deformaciones, vigas EBR bajo carga concentrada.  
Nota: Adaptado de Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015

**5.2.1.2 Análisis de resultados.** Primero que todo, mediante el experimento se observó que la preparación de la superficie fue un factor determinante para la correcta instalación de las láminas por la técnica EBR. Adicionalmente, después de realizadas las pruebas con carga, se logró constatar que las láminas incrementaron la capacidad de carga a flexión y la rigidez de las vigas probadas, hasta en un 78%.

Aunque se aumentó la capacidad de carga y la rigidez de las vigas a flexión, la falla que dominó gran parte del experimento fue la del desprendimiento del CFRP, tal y como se ha reportado en otros experimentos: (Mostofinejad & Shameli, 2013) y (G.M. Chen J. T., 2012), lo que marca de forma clara una de las debilidades de esta técnica.

Finalmente, según los resultados del experimento, se determinó que en ambos casos, tanto en cargas puntuales como en carga distribuida, el acero interno de refuerzo alcanzó su punto de fluencia, lo que permite decir que se logró un buen trabajo en conjunto entre el acero de refuerzo a flexión interno y las láminas de CFRP instaladas.

**5.2.2 Experimento número 2: Artículo “Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams.”** (Mostofinejad & Shameli, 2013), *Construction and Building Materials* 38 (páginas 751-758). Los especímenes emitidos para este estudio fueron 20 vigas de concreto sin refuerzo longitudinal, que se sometieron a una carga de flexión de cuatro puntos hasta el fallo. Las vigas eran de longitud  $L = 1000$  mm, de ancho  $b = 120$  mm y de altura  $h = 140$  mm. Estas dimensiones fueron elegidas para las vigas después de algunos cálculos iniciales y experimentos, considerando las dimensiones y capacidad del dispositivo de ensayo, la posibilidad de realizar todas las técnicas de refuerzo consideradas, la posibilidad de lograr la ruptura de CFRP para todas las vigas reforzadas con una capa de lámina de CFRP y la disponibilidad de material, dispositivo y mano de obra. Para asegurar los modos de fallo a flexión para todas las vigas y para evitar cualquier falla de corte no deseada durante las pruebas, todos los especímenes fueron reforzados internamente con estribos de acero de 5 mm de diámetro fijados con espaciadores y alambres apropiados.

Los especímenes de concreto se retiraron del molde sólo un día después de la fundida y se curaron en un baño de agua a una temperatura fija de 20°C durante 28 días. Los valores promedio de resistencia a la compresión cilíndrica del concreto a los 28 días se evaluaron a partir de prueba de compresión uniaxial de acuerdo con las normas ASTM. Se utilizó Sika Wrap Hex230C fibras de carbono unidireccional en esta investigación como la fase de fibra de las hojas de FRP. Según el fabricante, las hojas de fibra de carbono, tenían las siguientes propiedades: espesor por capa de 0,12 mm, resistencia a la tracción de 4100 MPa, módulo de elasticidad de 231 GPa y tensión de tracción final del 1,7%. Las fibras se cortaron en tiras de 100 mm de ancho y 850 mm de longitud y se aplicaron a la cara de tensión de las vigas mediante procedimiento de recubrimiento en húmedo utilizando resina epoxi Sikadur C300 como la fase de matriz del compuesto FRP. Los ensayos se llevaron a cabo bajo el control de desplazamiento con una relación de 2 mm por minuto. Se instaló

una célula de carga de 100 kN de capacidad y dos transductores lineales variables diferenciales (LVDT, por sus siglas en inglés), montados a mitad de la luz, y conectados a un registrador de datos para obtener una lectura exacta de la fuerza y la deflexión. La iniciación y propagación de la grieta también se controlaron mediante inspección visual durante las pruebas. La figura 10 representa la geometría de las vigas, la disposición de los estribos internos, la configuración de la prueba y las condiciones de carga y apoyo.

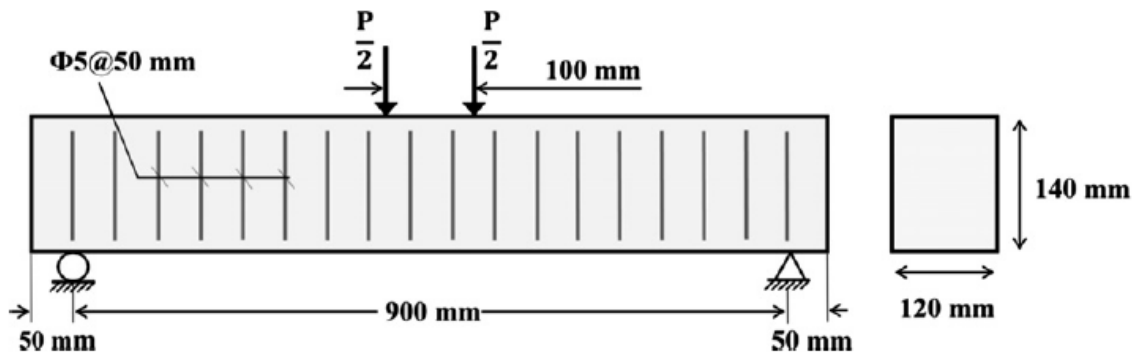


Figura 10. Geometría de las vigas.

Nota: Adaptado de Mostofinejad & Shameli, 2013

**5.2.2.1 Métodos de reforzamiento.** Las variables examinadas en el programa experimental fueron las siguientes:

1. La técnica de refuerzo: Se examinaron dos métodos de refuerzo distintos, es decir, EBR y EBRIG. También se consideró un grupo de especímenes en los que se aplicaron láminas de CFRP a las vigas utilizando la técnica EBR sin ninguna preparación superficial.
2. Número de hojas de CFRP adheridas: Todos los métodos de refuerzo fueron experimentados para una, dos y tres capas de hojas de CFRP. Además, cada prueba se aplicó a dos vigas idénticas

con el fin de evitar cualquier error no deseado y garantizar la validez de la prueba; por lo tanto, se realizaron pruebas de flexión en cuatro grupos.

El primer grupo consistió en dos vigas de control sin reforzar; mientras que las vigas en el segundo grupo fueron reforzadas con el método EBR, pero sin ninguna preparación superficial (grupo WSP). El tercer grupo consistió en seis vigas reforzadas con el método EBR con preparación superficial convencional. En este grupo, primero, se eliminó una fina capa de concreto. Luego se limpió la superficie con aire comprimido y se terminó con Sikadur C31 como capa de imprimación. A continuación, se aplicó una capa de epoxi (Sikadur C300) y se siguió con la aplicación en húmedo de las hojas de CFRP.

El cuarto grupo de vigas se reforzó con el método EBRIG introducido en el estudio actual. La técnica de reforzamiento de EBRIG consistió en los siguientes pasos:

- A. Se cortaron tres ranuras longitudinales en las superficies de las vigas y se limpiaron con aire comprimido y se les aplicó Sikadur C31.
- B. Las superficies de las ranuras fueron cubiertas con una capa muy delgada de Sikadur C300.
- C. Las hojas de fibra de carbono se unieron directamente a la superficie interna de las ranuras, así como a las superficies exteriores de las ranuras en la cara de tensión de la viga.
- D. Se aplicó de nuevo la resina epoxi Sikadur C300 sobre la superficie para cubrir completamente las hojas de fibra de carbono en las ranuras y en la superficie de la viga.
- E. Se eliminaron los sobrantes de resina.

Desde el punto de vista práctico, la aplicación del método EBRIG parece ser muy compleja. Debe apuntarse que prácticamente no es esencial que las fibras de carbono estén completamente unidas a las superficies de las ranuras y que la sola penetración de las láminas en las ranuras es suficiente. Además, algunos experimentos iniciales del presente estudio mostraron que la calidad final del método EBRIG se asegura si el procedimiento de refuerzo se realiza con una precisión

mínima. A pesar de que el método de fortalecimiento EBRIG requiere más cantidad de trabajo de instalación in situ en comparación con otras técnicas de fortalecimiento, vale la pena el esfuerzo si se pueden obtener mejores resultados. Detalles de los especímenes se pueden observar en la tabla 4.

**5.2.2.2 Resultados.** Las figura 11 – Figura 14 ilustran la deflexión en el centro de la luz de las vigas de prueba frente a la carga aplicada para las vigas de referencia y para las vigas reforzadas con el mismo número de capas de CFRP. La Figura 11 indica dos curvas para dos vigas de referencia idénticas. En las figura 12 – Figura 14, sin embargo, debido a la estrecha similitud entre las curvas de vigas idénticas, solo una de ellas se presenta; Así, cada una de las figura 12 – Figura 14 indica cinco curvas para vigas reforzadas con cinco métodos de refuerzo mencionados con una, dos o tres capas de hojas de CFRP, respectivamente.

Tabla 4.

*Detalles de los especímenes probados.*

Vigas	# de capas de CFRP	Fuerza a compresión cilíndrica [MPa]	Promedio carga última [kN]	Promedio desplazamiento último [mm]	Aumento en la capacidad de carga última (%) comparado con:		Modo de falla
					Vigas WSP	Vigas de referencia	
<i>Viga de referencia</i>							
<b>RB</b>	0	34.8	6.8	0.4	-	-	Falla a flexión
<i>Sin preparación de superficie</i>							
<b>WSP-1L</b>	1	37.6	8.4	3	-	23	Desprendimiento al extremo

Vigas	# de capas de CFRP	Fuerza a compresión cilíndrica [MPa]	Promedio carga última [kN]	Promedio desplazamiento último [mm]	Aumento en la capacidad de carga última (%) comparado con:		Modo de falla
					Vigas WSP	Vigas de referencia	
WSP-2L	2	38.4	14.3	1.9	-	110	Desprendimiento al extremo
WSP-3L	3	36.8	20.6	2.6	-	202	Desprendimiento al extremo
<b>EBR</b>							
EBR-1L	1	36.7	9.2	2.8	10	35	Desprendimiento al extremo
EBR-2L	2	37.1	14.5	2.7	1	113	Desprendimiento al extremo
EBR-3L	3	35.9	22.7	3.3	10	234	Desprendimiento al extremo
<b>EBRIG</b>							
EBRIG-1L	1	37	20.3	6.7	142	198	Rotura del CFRP
EBRIG-2L	2	37.8	40.9	8.2	186	501	Separación del recubrimiento del concreto
EBRIG-3L	3	36.3	52.5	9.7	155	672	Separación del recubrimiento del concreto

Nota: Adaptado de Mostofinejad & Shameli, 2013

Se puede observar a partir de las figura 11 – Figura 14 que las variaciones de las rigideces de las vigas no son evidentes antes del inicio de las grietas de tensión. En este momento, la pendiente de la carga frente a la deflexión en el medio del tramo de las vigas de referencia es casi igual a la de las vigas reforzadas, lo que demuestra que en las vigas reforzadas las cargas son principalmente asumidas por el concreto antes de que las fisuras aparezcan en él; sin embargo, reforzar las vigas con láminas u hojas de FRP atrasa el inicio de estas grietas.

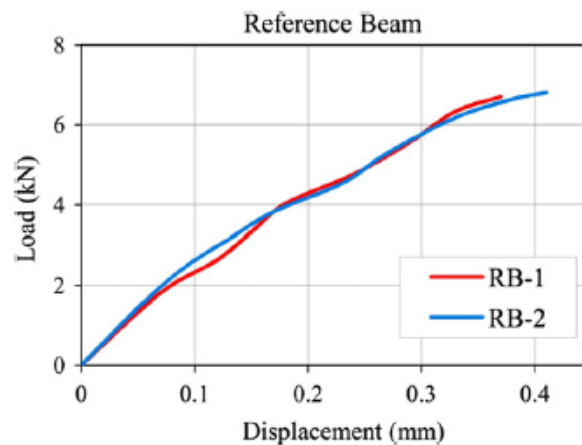


Figura 11. Carga (kN) vs deflexión (mm) a mitad de la luz en vigas de referencia.

Nota: Adaptado de Mostofinejad & Shameli, 2013

Después de la aparición de grietas y disminución repentina de rigidez, la rigidez de las vigas reforzadas se ve aumentada de nuevo proporcionalmente de acuerdo al número de capas de refuerzo que tenga (fenómeno de fluencia). La rigidez también ha sido influenciada por los métodos de reforzamiento, ya que las vigas reforzadas con la técnica EBRIG han demostrado un comportamiento más rígido comparado con las reforzadas con el método EBR. Los valores medios de las deflexiones finales y cargas finales para cada serie de vigas se presentan en la Tabla 4.

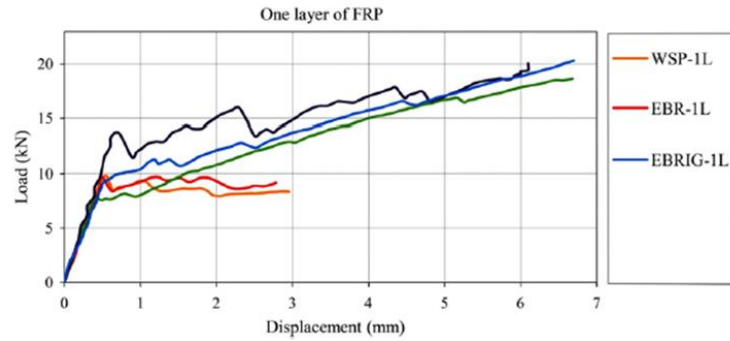


Figura 12. Carga (kN) vs deflexión (mm) a mitad de la luz en vigas WSP-1L, EBR-1L y EBRIG-1L (1 capa de FRP).

Nota: Adaptado de Mostofinejad & Shameli, 2013

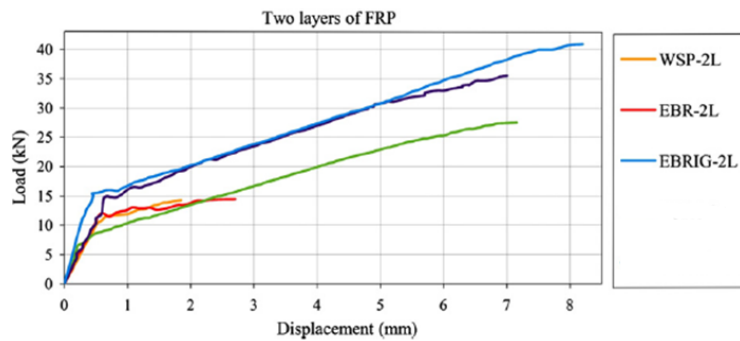


Figura 13. Carga (kN) vs deflexión (mm) a mitad de la luz en vigas WSP-2L, EBR-2L y EBRIG-2L (2 capas de FRP).

Nota: Adaptado de Mostofinejad & Shameli, 2013

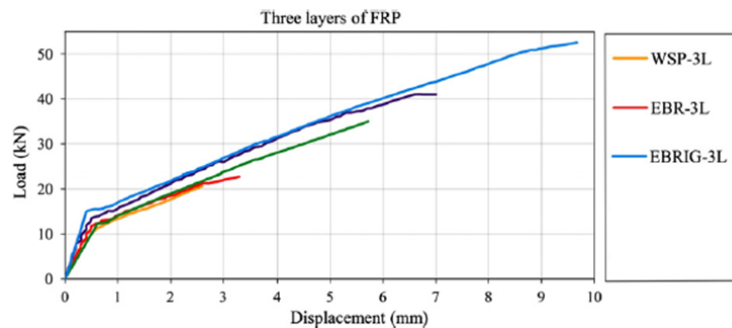


Figura 14. Carga (kN) vs deflexión (mm) a mitad de la luz en vigas WSP-3L, EBR-3L y EBRIG-3L (3 capas de FRP).

Nota: Adaptado de Mostofinejad & Shameli, 2013

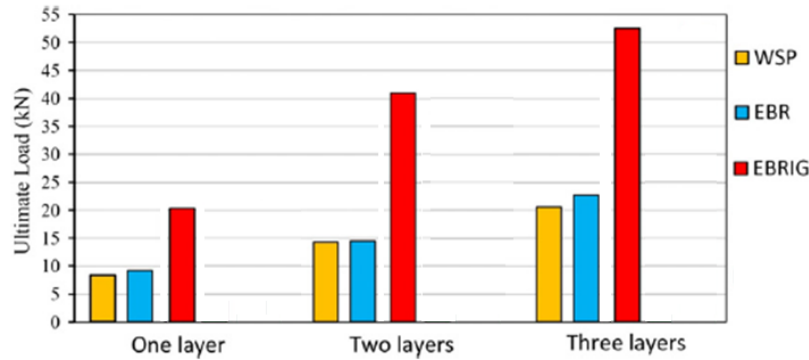


Figura 15. Comparación de carga última entre vigas WSP, EBR y EBRIG.

Nota: Adaptado de Mostofinejad & Shameli, 2013

**5.2.2.3 Efecto de la técnica de reforzamiento.** En la columna 6 de la Tabla 4, se han comparado las cargas finales de las vigas reforzadas con preparación de superficie con las de las mismas vigas reforzadas sin preparación superficial. Se puede observar en la tabla que la capacidad de carga máxima del EBR-1L ha aumentado un 10% en comparación con la de WSP-1L. Este aumento es 142% para la EBRIG-1L. Cuando los especímenes se refuerzan con dos capas de CFRP, el aumento de la carga final comparado con el de WSP-2L es 1% y 186% para las vigas EBR-2L y EBRIG- 2L respectivamente. Adicionalmente, para las vigas de prueba reforzadas con tres capas de CFRP, el aumento de las cargas finales en comparación con el de la muestra WSP-3L es de 10% y 155% para las vigas EBR-3L y EBRIG-3L respectivamente. En la figura 15, se ha realizado una comparación para las cargas finales de todos los especímenes, mostrando la influencia significativa de diferentes técnicas de refuerzo sobre la capacidad de carga final de las vigas.

**5.2.2.4 Efecto del número de capas de CFRP.** Los resultados experimentales mostraron que los CFRP multi-capas de refuerzo detienen o retrasan eficazmente el desarrollo de las fisuras y, por lo tanto, aumentan considerablemente la rigidez y la carga final de las vigas en comparación con el

reforzamiento de capa única. En la columna 7 de la Tabla 4, la carga final de cada viga de prueba se ha comparado con la de la viga de referencia sin ningún refuerzo en flexión. Se observa en la tabla que para los especímenes de WSP-1L, EBR-1L y EBRIG-1L, los incrementos son 23%, 35% y 198%, respectivamente. Para los especímenes WSP-2L, EBR-2L y EBRIG-2L, los incrementos en cargas finales son 110%, 113% y 501%, respectivamente. También se observa que para los especímenes WSP-3L, EBR-3L y EBRIG-3L, los aumentos son respectivamente 202%, 234% y 672%.

**5.2.2.5 Modos de falla y patrones de fisuras.** Se identificaron tres patrones de falla de flexión observados en las muestras probadas: separación de la interfaz en el extremo de placa, separación del recubrimiento del concreto y rotura de CFRP. Los experimentos mostraron que el espécimen EBRIG-1L falló debido a la ruptura del CFRP. En esta muestra aparecieron grietas en flexión durante las pruebas, pero no causaron el desprendimiento de las láminas de CFRP. Los especímenes EBRIG-2L y EBRIG-3L fallaron debido a la separación del recubrimiento de concreto. En estos especímenes, las grietas comenzaron al final del refuerzo de CFRP y se propagaron diagonalmente hacia el interior a los estribos internos de cortante y luego se extendieron a lo largo en dirección horizontal lo que causó el desprendimiento de la cubierta de concreto. Todos los otros especímenes fallaron debido al desprendimiento de las láminas de CFRP. En este modo de fallo, se iniciaron grietas en el extremo de la hoja de CFRP y se propagaron hacia adentro a través del CFRP y de la interfaz de concreto, lo que provocó el desprendimiento de la lámina de CFRP del sustrato de la viga.

**5.2.2.6 Análisis de resultados.** En este experimento se analizaron dos métodos de reforzamiento, con una variación en uno de ellos que generó un tercer método. EBR sin preparación de superficie,

EBR y EBRIG. Primero que todo se logró constatar que la preparación de la superficie juega un papel determinante en el desempeño del refuerzo CFRP, como también se puede observar en (Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015) y (El-Ghandour, 2011), ya que las vigas que no contaron con la preparación adecuada demostraron un comportamiento bastante inferior respecto a las otras vigas reforzadas con CFRP.

También, se introdujo la técnica de EBRIG con la idea de mejorar el vínculo entre el CFRP y el concreto, con resultados satisfactorios ya que con la viga EBRIG de 3 capas (EBRIG-3L) se alcanzó hasta un 672% de mejoría en la resistencia a flexión respecto a la viga de control.

Finalmente, a la comprobación de la necesidad de la preparación de la superficie se adhiere la evidencia de que al incrementar el número de capas de CFRP se pueden obtener mejores resultados. Es importante mencionar que la falla más común es el desprendimiento del CFRP, alternando con la falla de desprendimiento del CFRP junto con el recubrimiento del concreto, que también se observó en algunas vigas.

**5.2.3 Experimento número 3: Artículo “Experimental and analytical investigation of CFRP flexural and shear strengthening efficiencies of RC beams”** (El-Ghandour, 2011), *Construction and Building Materials* 25 (páginas 1419-1429) Siete vigas a escala, de 300 mm de profundidad por 120 mm de sección transversal, se probaron estáticamente hasta la falla con carga en tres puntos, como se muestra en la figura 16. Todas las vigas tenían 2000 mm de largo con 1800 mm de espacio libre (figura 16a), y se dividieron en tres grupos de acuerdo con las relaciones internas de acero a flexión y cortante. La figura 16b muestra que el grupo (1) constaba de dos vigas críticas a flexión, B1 y B1F, reforzadas por tres barras inferiores de 16 mm de diámetro (cuantía  $\rho = 1,86\%$ ) y dos barras superiores de 8 mm de diámetro (soporte para los estribos), así como estribos cerrados de dos ramas verticales de 10 mm de diámetro espaciados a 100 mm (cuantía vertical  $\rho_v$

= 1,3%). La figura 16c muestra que el grupo (2) constaba de dos vigas críticas a cortante, B2 y B2S, reforzadas por dos estribos verticales de 6 mm de diámetro espaciados cada 200 mm ( $\rho_v = 0,23\%$ ), así como seis barras inferiores de 18 mm de diámetro ( $\rho = 4,71\%$ ) y dos barras superiores de 10 mm de diámetro. La figura 16d muestra que el grupo (3) constaba de tres vigas críticas a flexo-cortante, B3, B3S y B3FS, reforzadas por cuatro barras inferiores de 16 mm de diámetro ( $\rho = 2,48\%$ ) y dos barras superiores de 8 mm de diámetro, así como estribos de dos ramas verticales de 6 mm de diámetro espaciados cada 200 mm ( $\rho_v = 0,23\%$ ). La nomenclatura de los especímenes de prueba es la siguiente: el primer carácter, B, se refiere a viga, el segundo carácter, 1, 2 o 3, es el número del grupo, y los siguientes caracteres, F y S, se refieren al esquema adoptado de CFRP a flexión y cortante, respectivamente.

**5.2.3.1 Configuraciones de refuerzo.** La figura 17 muestra los esquemas de refuerzo, en los que a diferencia de las tres vigas de control B1-B3, las otras cuatro vigas fueron reforzadas con CFRP a flexión y/o cortante, de la siguiente manera:

-B1F fue reforzado a flexión por una lámina de CFRP (100 mm de ancho x 0,176 mm de espesor), posicionada simétricamente alrededor del eje vertical de la sección (Figura 17a). Los revestimientos en U de los extremos estaban previstos para evitar el desprendimiento de la lámina a flexión.

-B2S y B3S fueron reforzadas a cortante mediante revestimientos en U similares (50 mm de ancho x 0,176 mm de espesor), espaciadas a 187,5 mm dentro de las zonas de cortante constante (Figura 17b). Los revestimientos en U se extienden verticalmente a 40 mm por debajo de las fibras superiores (simulando la existencia de losas).

-B3FS fue reforzada a flexión y cortante por esquemas similares a B1F y B2S (Figura 17c), respectivamente.

Las láminas a flexión se aplicaron según las especificaciones del fabricante y el ACI 440.2R-08. Se instalaron tradicionalmente mediante la aplicación del adhesivo de resina epoxi al sustrato de concreto, después de alistar la superficie del concreto, seguido de la colocación de las láminas manualmente y presionar sobre el adhesivo con un rodillo de goma.

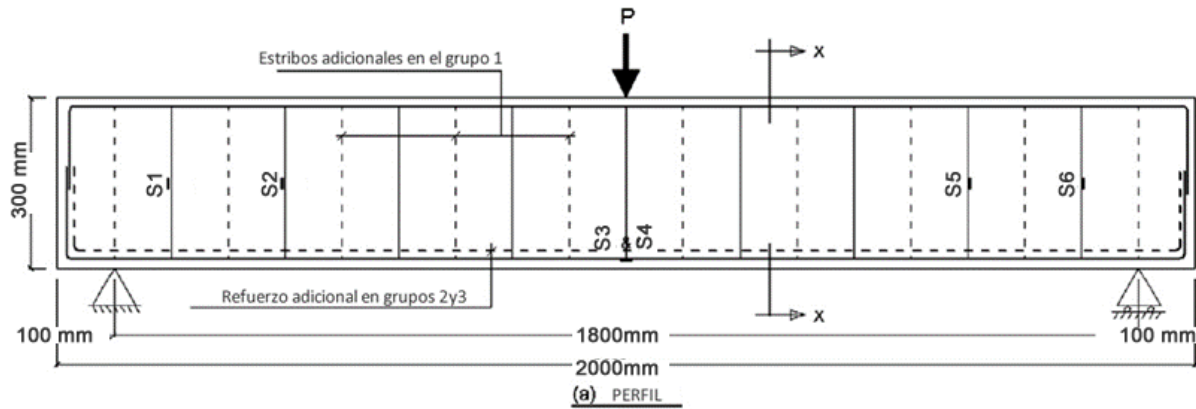


Figura 16. a – Vista de perfil vigas.  
Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

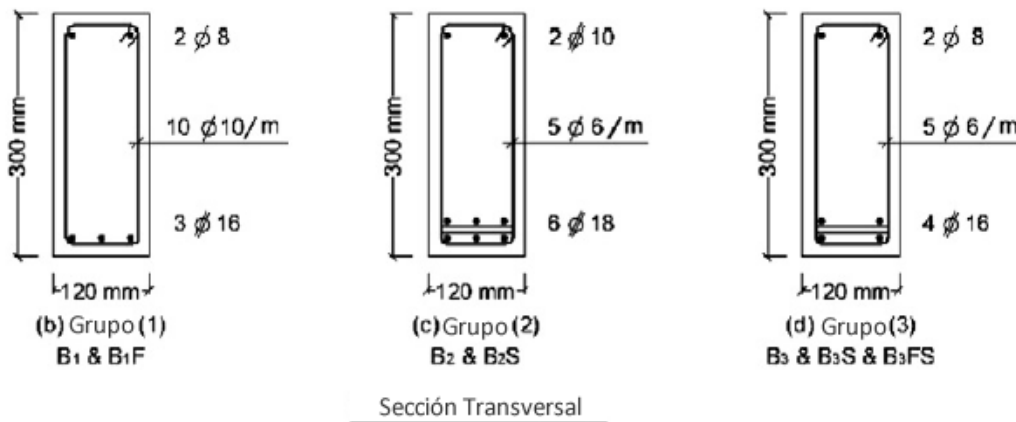


Figura 16. b, c y d – Sección transversal grupos 1, 2 y 3.  
Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

**5.2.3.2 Propiedades de los materiales.** Todo el acero interno con un diámetro mayor de 8 mm fue fabricado con barras de acero con  $f_y = 400$  MPa y resistencia a la tracción final,  $f_u = 600$  MPa. Las barras de 8 y 6 mm de diámetro tienen  $f_y = 290$  MPa, y resistencia a la tracción final,  $f_u = 420$  MPa. Todo el acero tenía un módulo elástico,  $E_s = 200.000$  MPa. Se usó concreto de peso normal ( $2.4 \text{ ton/m}^3$ ) de 28 días de resistencia media en compresión compacta,  $f_{cu} = 48,1$  MPa, y fuerza de compresión del cilindro,  $f'_c = 39,5$  MPa. Todas las vigas fueron fundidas en formaleta de madera, al mismo tiempo y del mismo lote. Las propiedades mecánicas de las láminas CFRP, junto con el imprimador de resina epoxi y el adhesivo, se muestran en la tabla 5, según las hojas de datos del fabricante.

**5.2.3.3 Instrumentación.** La figura 18 muestra que se usaron tres transductores lineales de distancia variable (LVDT, por sus siglas en inglés) de precisión de 0,01 mm para medir las deflexiones de las secciones (D1 y D3) y en el centro de la luz (D2). La deformación compresiva del concreto (C), en el centro de la luz, se midió mediante un medidor de deformaciones de 10 mm de largo, y una resistencia de 120 ohmios. Se montaron dos medidores de deformaciones de 10 mm de longitud y resistencia de 120 ohmios (S3 y S4) al centro de la luz, en las esquinas de las barras de acero de tracción de todas las vigas ensayadas, como se muestra en la figura 16. La figura 16 también muestra que otros cuatro medidores similares (S1, S2, S5 y S6) fueron montados en los lados alternos de los estribos cerca de los soportes. La figura 17 muestra que las deformaciones por tracción de las hojas a flexión y de los revestimientos en U se midieron mediante 5 medidores (SF1-SF5) y 10 medidores (SC1-SC10), similares a los de acero, respectivamente.

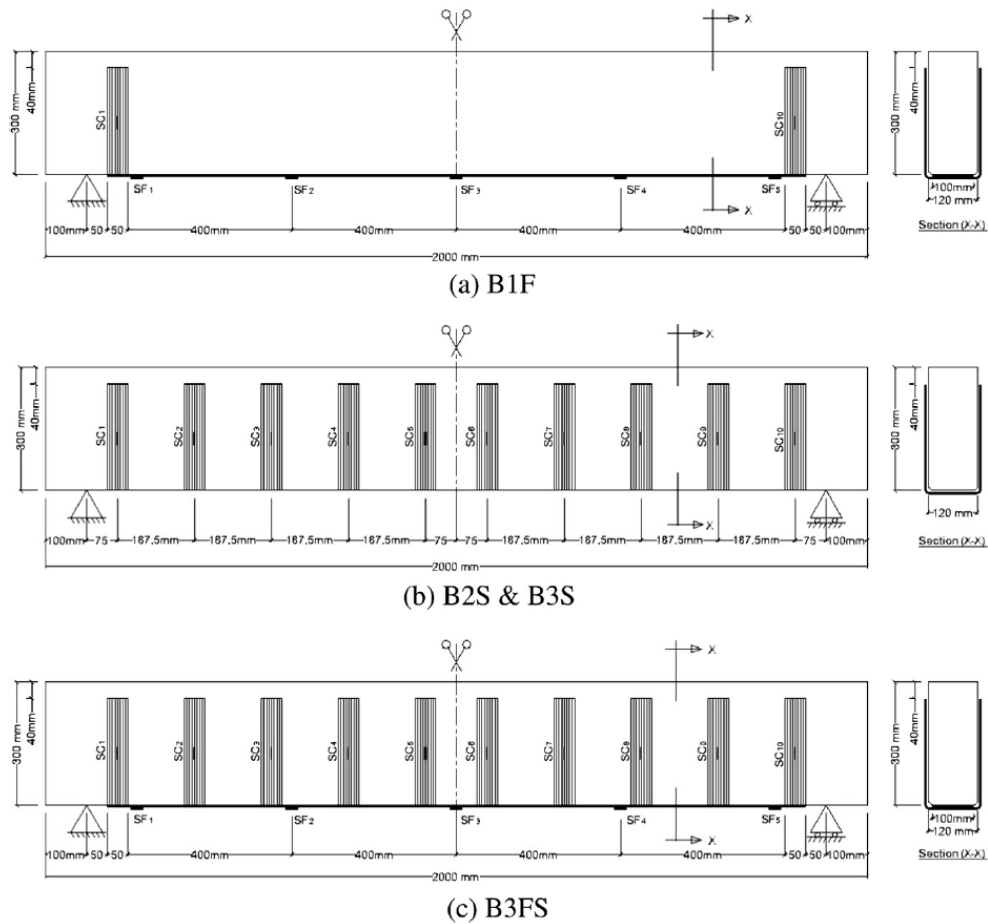


Figura 17. Esquemas de refuerzo y localización de los extensómetros en las hojas CFRP.  
 Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

Tabla 5.  
 Propiedades mecánicas del CFRP y adhesivo utilizados.

Propiedad del material	Epoxy primer sikadur-41CF	Epoxy adhesivo sikadur-31CF	Láminas CFRP	Revestimiento en U
			Láminas	
Dimensiones (mm)	-	-	100 x 0.176	50 x 0.176
Área sección transv (mm <sup>2</sup> )	-	-	17.6	8.8
Fuerza a comp (N/mm <sup>2</sup> )	65-75	60-70	-	
Fuerza a tracción (N/mm <sup>2</sup> )	10-15	15-20	3800	
Módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	9000	4300	240000	
Fuerza a flexión (N/mm <sup>2</sup> )	25-35	30-40	-	

Propiedad del material	Epoxy primer sikadur-41CF	Epoxy adhesivo sikadur-31CF	Láminas CFRP Láminas	Revestimiento en U
Fuerza de vínculo (conc)(N/mm <sup>2</sup> )	(1)	3.5	-	
Deformación última a tracción	-	-	0.0155	

(1)= La falla ocurre en el concreto.

**Nota:** Adaptado de El-Ghandour, 2011

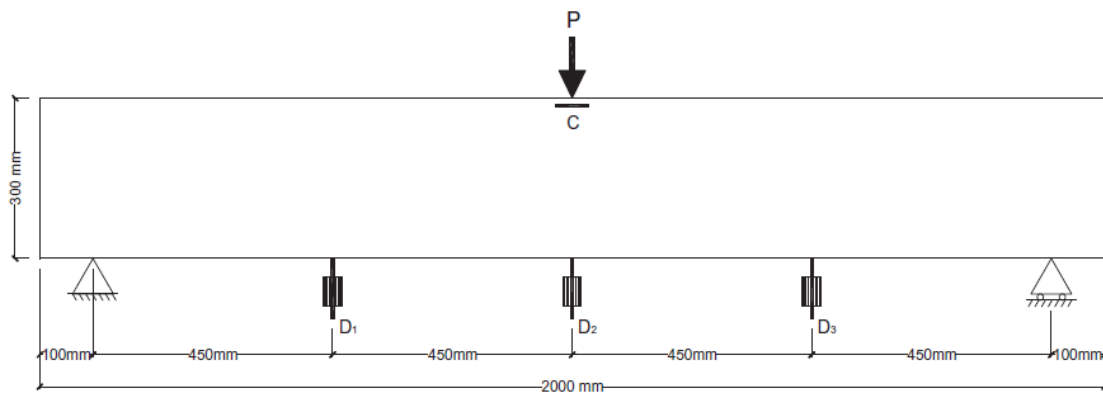


Figura 18. Medidas de deflexión y deformación del concreto.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

**5.2.3.4 Configuración del experimento y procedimiento de carga.** Las vigas se probaron estáticamente en tres puntos de flexión. La carga se aumentó manualmente y de forma constante hasta el fallo, utilizando un gato hidráulico de 300 kN de capacidad y 2,5 kN de precisión. Cada incremento (5 kN) se aplicó durante 2 min, al final del cual la carga se mantuvo constante para las mediciones y observaciones.

### 5.2.3.5 Resultados experimentales

5.2.3.5.1 *Observaciones de la prueba.* En la prueba se pudieron observar los patrones de fisuras tradicionales en todas las vigas (Figura 19), con grietas verticales de flexión a medio tramo, y las de flexión + corte cada vez más inclinadas y ubicadas más hacia los extremos. En cargas elevadas, el diseño de vigas y esquemas de refuerzo dieron como resultado variaciones en los patrones de fisuras, modos de falla y capacidad. Las figura 19 b y g muestran que el refuerzo de flexión dio como resultado más grietas uniformes, cubriendo porciones más largas de los tramos B1F y B3FS con anchos más pequeños, con respecto a B1 y B3S (Figura 19 a y f), respectivamente. La tabla 6 muestra un 33,3% de aumento de la carga de rotura, debido a la redistribución uniforme de la tensión de la lámina en B1F y B3FS, con respecto a B1 y B3S, respectivamente. Las altas relaciones de refuerzo de flexión de los grupos (1) y (3), con  $p = 1,86\%$  y  $2,48\%$ , respectivamente, dictaron un bajo nivel de refuerzo a flexión ( $p_f = 0,05\%$ ) y resultaron en modos de fallo sin cambios en B1F y B3FS, a  $9,7\%$  y  $3,33\%$  de capacidades mejoradas, en relación con B1 y B3S, respectivamente. En las figura 20 a y d se muestra que B1F falló a flexión por rotura de CFRP y luego por el aplastamiento del concreto en la parte superior la viga a 170 kN (tabla 6), mientras que B3FS falló por flexión/corte a 155 kN (tabla 6), respectivamente. Una grieta de división inclinada se inició a nivel de acero de tensión B3FS y se propagó casi verticalmente hacia el centro de la luz, causando la rotura de la hoja y luego el aplastamiento del concreto en la parte superior de la viga y el desprendimiento del sexto revestimiento en forma de U (figura 20d). B3S falló de forma similar, pero más lejos del centro de la luz, donde se desprendieron el sexto y séptimo revestimiento en forma de U (figura 20c). Las fallas combinadas B3S y B3FS se deben al efecto de los revestimientos en U en redirigir verticalmente las grietas inclinadas, hasta que ocurrieron fallas a flexión. El despreciable aumento del  $3,33\%$  de la capacidad en B3FS sobre B3S, en relación con

el valor del 9,7% en B1F sobre B1 (tabla 6), revela la sensibilidad del refuerzo de flexión al mayor nivel de daño por corte en las fallas de las vigas del grupo (3) con una relación de refuerzo a flexión más alta. Las Figura 21d y f muestran que el refuerzo a cortante produjo fisuras de flexión/cortante relativamente uniformes y mayor concentración de grietas de flexión en B2S y B3S, con relación a B2 y B3 (figura 19 c y e), respectivamente. La tabla 6 muestra la insensibilidad de las cargas de rotura al refuerzo a cortante.

Las figura 19 d y f también muestran que el refuerzo a cortante cambió los fallos frágiles de corte-tensión de B2 y B3 (figura 19 c y e) a fallo de corte-compresión en B2S ( $p= 4,71\%$ ) y fallo de flexión-corte en B3S ( $p= 2,48\%$ ), respectivamente, a capacidades considerablemente mejoradas, dictadas por la baja relación de estribos ( $p_v= 0,23\%$ ) de los grupos (2) y (3). En la figura 19 20b se muestra la grieta de división inclinada, que se inicia a nivel de acero de tensión de B2S y se propaga hasta la mitad del vano, provocando la rotura de la esquina del tercer revestimiento en forma U y el desprendimiento del cuarto y quinto revestimiento, así como también se muestra el aplastamiento del concreto en la parte superior de la viga a 225 kN (tabla 6). La falla B3S descrita anteriormente (figura 20c) se produjo a 150 kN (tabla 6). El aumento de la capacidad de B2S sobre B2 (32,4%), en relación con B3S sobre B3 (20%), refleja el efecto negativo de la baja relación de acero a flexión del grupo (3) y el alto nivel de daño a flexión en la eficiencia de refuerzo de corte.

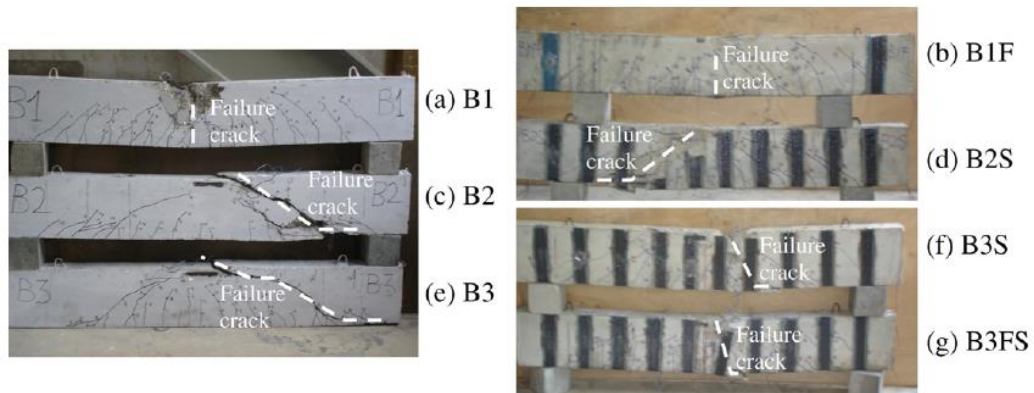


Figura 19. Patrones de fisuras de las vigas probadas a la falla.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

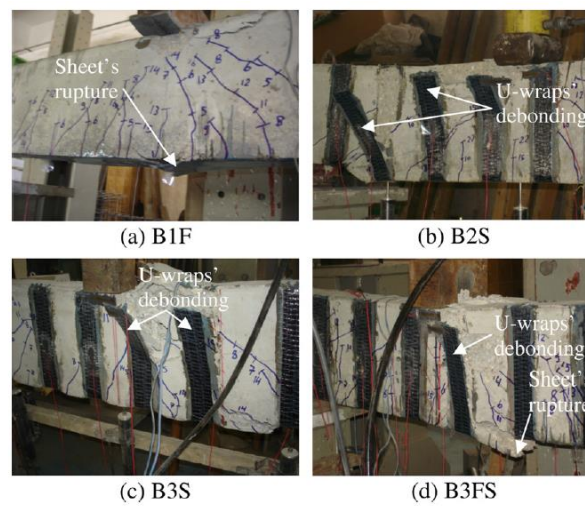


Figura 20. Acercamiento a las fallas de todas las vigas reforzadas.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

Tabla 6.

*Capacidades y modos de falla de las vigas.*

Código de la viga	Sistema de refuerzo		Carga de fisuración o agrietamiento, $P_o$ (kN)	Carga de falla, $P_u$ (kN)	Modo de falla	Capacidad mejorada (%)
	Láminas	Revestimiento en U				
<b>B1</b>	Ninguna	Ninguna	30	155	Flexión (Fluencia del acero)	-
<b>B1F</b>	Una	2 - finales	40	170	Flexión (Ruptura CFRP)	9.7
<b>B2</b>	Ninguna	Ninguna	100	170	Cortante - Tensión	-
<b>B2S</b>	Ninguna	Una / 187.5 mm	100	225	Cortante - Compresión	32.4
<b>B3</b>	Ninguna	Ninguna	30	125	Cortante - Tensión	-
<b>B3S</b>	Ninguna	Una / 187.5 mm	30	150	Combinada Flexión-Cortante	20
<b>B3FS</b>	Una	Una / 187.5 mm	40	155	Combinada Flexión-Cortante	24

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

5.2.3.5.2 *Deflexiones*. La figura 21 muestra las curvas carga contra deflexión en el centro de la luz, D2, de las vigas ensayadas. La relación de acero de flexión más alta, el incremento de la inercia agrietada del grupo (2), se refleja en la mayor rigidez y capacidad de corte de B2 y B2S. Aunque se observó una rigidez más baja y casi similar para los grupos (1) y (3), con menores relaciones de acero en flexión que el grupo (2), diferentes modos de comportamiento y falla ocurrieron ante altas cargas, dependiendo del refuerzo. El efecto del refuerzo a cortante se muestra en la figura 23, B2S incrementó la capacidad de deformación en 114,7% con respecto a B2 fallando a tensión por corte. Esto refleja la eficiencia del sistema B2S, hasta que el fallo de compresión por corte aumente la capacidad respecto al B2, en un 32,4%. Las mejoras anteriores se reducen considerablemente en B3S con respecto a B3 (53,8% de capacidad de deformación aumentada y 20% de capacidad aumentada); confirmando el efecto negativo del alto daño a flexión del grupo (3) sobre la eficiencia

del refuerzo a cortante, especialmente en aplicaciones de controladas por la fuerza. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** también muestra que el refuerzo a flexión de B1F dio como resultado una rigidez mejorada comparada con B1 cerca de la falla, donde el endurecimiento de la hoja aumentó la inercia efectiva del elemento. En comparación con los últimos resultados, la rigidez insignificante, la ductilidad del 10% y los aumentos de capacidad del 3,33% en B3FS con respecto al B3S, confirman el efecto negativo del alto daño a cortante del grupo (3) sobre el refuerzo a flexión, especialmente en aplicaciones controladas por la fuerza.

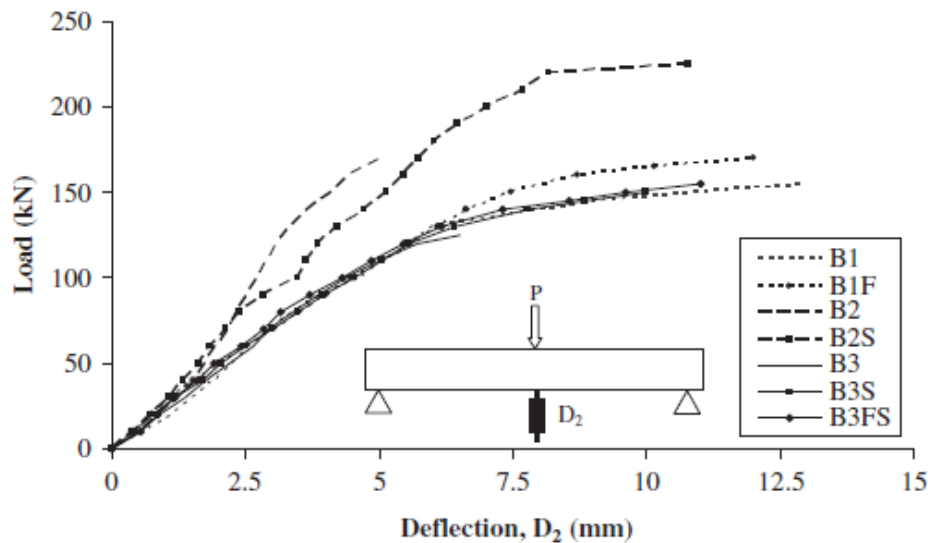


Figura 21. Carga (kN) vs Deflexión (mm) en el centro de la viga.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

5.2.3.5.3 Las deformaciones por tensión en el acero a flexión y las hojas CFRP. La figura 22 muestra las curvas de cargas contra deformación de tracción interna del acero, S3, a mitad de la luz de todas las vigas ensayadas. Mientras que las vigas del grupo (2), con secciones transversales reforzadas en exceso, mostraron respuestas casi lineales con mayor rigidez, los grupos (1) y (3), con relaciones de acero más bajas, demostraron respuestas bi-lineales a la fluencia. Debe

observarse que las respuestas de deflexión bi-lineales de las vigas de los grupos (1) y (3) en la Figura 23 ocurrieron a cargas más altas (cerca del fallo) ya que, a diferencia de las respuestas de la figura 22, representan el comportamiento de las vigas a nivel del elemento; es decir, la tendencia bi-lineal en las respuestas de deflexión se produce cuando el acero de tensión de varias secciones consecutivas entra en fluencia.

La figura 22 muestra la alta sensibilidad del refuerzo a cortante al nivel de daño a flexión de B2S y B3S al momento de la falla. Se obtiene una eficiencia de refuerzo a cortante relativamente alta en B2S que falla a compresión por cortante cerca de su capacidad a flexión con un aumento del 32,4% (con relación a B2). A pesar del exceso de refuerzo, el fallo B2S se produjo posterior a la fluencia del refuerzo a tensión. Esto se debe a la capacidad de deformación mejorada del concreto más allá de 0,003, debido al confinamiento inducido de los estribos. Se observó una menor eficiencia del refuerzo a cortante en el B3S, fallando en el modo combinado con un aumento del 20% de la capacidad con respecto al B3, debido al alto daño a flexión al momento de la falla del grupo (3). Este alto daño a flexión se refleja en la respuesta B3, donde el fallo a cortante se produjo mucho más allá de la fluencia del acero en tensión (0.004). Sin embargo, el fortalecimiento a cortante mejoró la ductilidad B3S, movilizándolo el acero de tensión a una deformación post-fluencia de 0,01 al fallar.

La figura 22 también muestra la alta sensibilidad del refuerzo a flexión al nivel de daño por cortante B1F y B3FS. De hecho, la respuesta de B1F refleja un ligero aumento en la carga de fluencia (5,3%) y la rigidez post-fluencia, hasta el fallo a flexión en un 9,7% de aumento de capacidad y un 23,5% de deformación de falla reducida con relación a B1. Estos resultados son más altos que el despreciable aumento de la capacidad de 3,33% y el 2% de reducción de la deformación de falla del B3FS con relación al B3S. La última eficiencia del refuerzo a flexión se reduce por el alto daño a cortante del grupo (3) al momento de la falla.

La figura 23 muestra la carga vs deformación por tensión (SF3) bi-lineal y muy similar a las curvas de hojas flexibles B1F y B3FS a mitad de tramo hasta que falla. La rigidez ligeramente superior de B3FS se debe a su mayor relación de acero a flexión. La rigidez disminuyó cuando el acero entró en fluencia, donde se desarrollaron deformaciones más altas en las láminas hasta la ruptura a 0,015 (B1F) y 0,009 (B3FS). Mientras que la deformación anterior refleja la activación completa de la hoja en el fallo a flexión de B1F con un nivel de daño por cortante bajo, este último valor refleja la ruptura prematura por la fisura de rotura de flexión por corte de B3FS, asociada al alto nivel de daño por cortante de la viga.

Sin embargo, la confianza en los resultados de las láminas necesita pruebas experimentales de la acción compuesta efectiva hasta el fallo, como se muestra en la figura 24, que muestra comparaciones entre las curvas de deformación de carga a tracción en el centro de la luz de las láminas B1F y B3FS, SF3 y el acero interno adyacente S3. Se observan deformaciones de CFRP cada vez más altas con respecto a las de acero adyacentes hasta que el acero entra en fluencia, donde se producen las brechas máximas entre las deformaciones de CFRP y de acero. Después de entrar en fluencia, la rigidez reducida por la respuesta del acero dio como resultado el estrechamiento de las brechas, hasta cruzar las respuestas correspondientes de CFRP antes de la ruptura. La unión asegurada hasta la falla entre las láminas CFRP a flexión y el sustrato de concreto se demuestra también en la figura 25, donde los perfiles de las deformaciones por tensión longitudinales de las láminas B1F y B3FS siguieron los requisitos de momento de flexión de la configuración de prueba a diferentes niveles de carga hasta el fallo (los perfiles a 100 kN y falla se muestran típicamente en la figura 25).

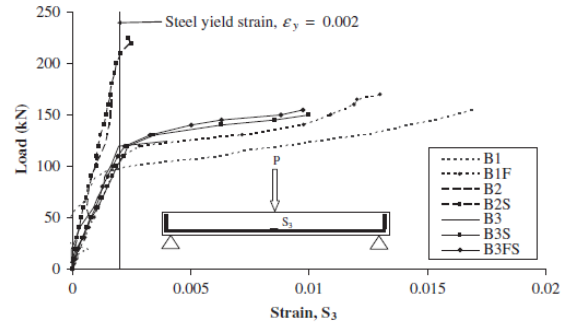


Figura 22. Respuestas de deformación del acero de tensión de todas las vigas ensayadas  
Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

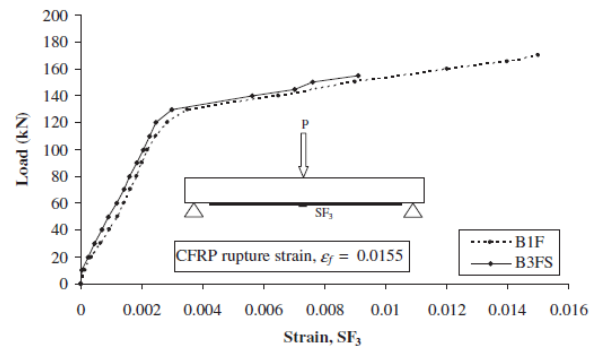


Figura 23. Respuestas de deformación en el centro de las láminas CFRP a flexión.  
Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

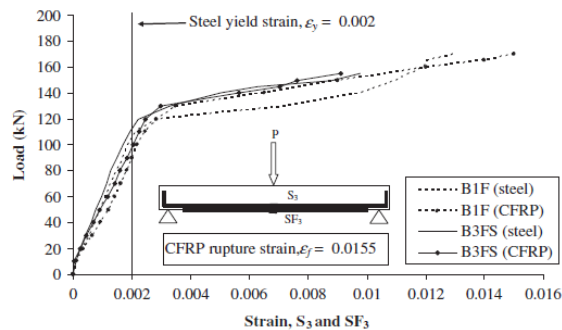


Figura 24. Comparación entre las respuestas de deformación por tracción del acero de flexión y los CFRP.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

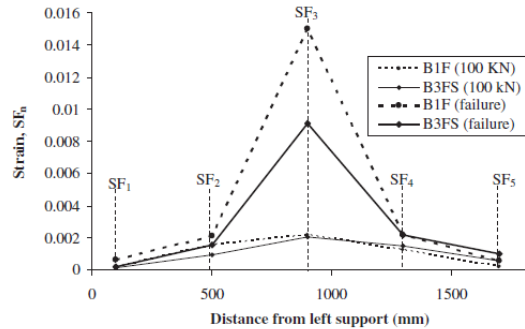


Figura 25. Comparación de los perfiles de deformación por tracción de los CFRP a flexión a diferentes niveles de carga.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

5.2.3.5.4 *Deformaciones del concreto.* Las curvas carga contra deformación del concreto,  $C$ , en el centro de la luz de todas las vigas se muestran en la figura 26. En la figura se muestra la mayor rigidez de las respuestas del grupo (2), así como las fallas frágiles de tensión por cortante de B2 y B3, en las que se desarrollaron deformaciones de concreto similares de alrededor 0,002. La figura 26 reconfirma una mayor eficiencia de refuerzo a cortante de B2S en comparación a B3S, debido al bajo daño por flexión del grupo (2). Sin embargo, los cambios de los modos de fallo, desde la tensión por cortante en B2 y B3 hasta la compresión por cortante en B2S o la flexión por cortante en B3S, resultaron en aumentos de la deformación de falla del mismo orden a 0,004 y 0,0035 (ductilidad aumentada), respectivamente. Esos valores, más allá de 0,003, se deben al confinamiento inducido por estribos similares en B2S y B3S. Esto está en línea con el ACI 318M-05, afirmando que las deformaciones del concreto de compresión máximas varían de 0,003 a más de 0,008, dependiendo del grado de confinamiento. Esto también justifica el fallo a flexión del grupo (1), con la mayor cantidad de estribos, en las deformaciones más altas de 0,005 en B1 y de 0,0046 en B1F. La figura 27 también muestra una mayor eficiencia del refuerzo a flexión de B1F en comparación con la de B3FS, debido al daño por cortante más bajo del grupo (1). Se obtuvieron

ligeras reducciones de la deformación de falla, del 8% y del 8,5%, en B1F y B3FS en comparación con B1 y B3S, respectivamente.

#### *5.2.3.5.5 Deformaciones por tensión en los estribos de acero y los revestimientos en U de CFRP.*

La figura 27 muestra las curvas de carga contra deformación por tensión de los estribos de acero (S2 y S5) de todas las vigas. Las localizaciones casi inactivas S1 y S6 (que desarrollan una deformación de falla de límite superior de 0,0006 en las vigas ensayadas) en las regiones de discontinuidad, regiones D, cerca de los soportes, no se muestran. Excepto B2, B3 y B2S que fallan por cortante, los estribos sólo se activaron por debajo de la fluencia, debido a fallos a flexión y combinados en las regiones D del centro de la luz, cerca de la carga concentrada. Todas las respuestas fueron bi-lineales, debido al agrietamiento por cortante y la activación relativa de los estribos. Las respuestas de S5 en la figura 27b reflejan las grietas de falla de tensión por cortante en B2 y B3, en las que se produjeron deformaciones post fluencia de 0,00161 y 0,0017 (superiores a las medidas por S2 en la figura 27a), respectivamente. Las respuestas del S2 en la figura 27a reflejan en la región B izquierda de B2S una grieta de falla por compresión debido al cortante, donde ocurrieron deformaciones de 0,00175 post fluencia, mientras que la deformación para B2S, medida por S5 (figura 27b), cayó justo después de entrar en fluencia. Cabe señalar que la región B anterior es la región donde la hipótesis de Bernoulli (teoría de flexión) es válida.

La figura 27 también muestra la alta eficiencia del reforzamiento a cortante de B2S, demostrada por una mayor rigidez después del agrietamiento que B2 y un 32,4% de aumento de capacidad. El agrietamiento por flexión más alto de B3S resultó en sólo un 20% de aumento de capacidad con respecto a B3 (la mejora de la capacidad B3S sobre B3 se redujo en un 38,3% con respecto a la de B2S sobre B2) y respuestas casi verticales cerca de la falla, donde dominaron las deformaciones por flexión y no se desarrollaron más deformaciones en los estribos. Sin embargo, el refuerzo a

cortante se activó relativamente hasta una deformación de 0,0034 (21,9% de la deformación de rotura del CFRP) en la región media del agrietamiento de falla de flexión por cortante en B3S.

La figura 27 finalmente muestra que el fortalecimiento a flexión de B3FS no podría movilizar más las deformaciones por cortante. Respuestas muy similares a B3S ocurrieron para B3FS, pero a un 2,8% más alto de las cargas de agrietamiento por cortante, y tendencias post agrietamiento más rígidas (rigidización de las láminas), hasta una despreciable mejora del 3,33% de capacidad con respecto a B3S. El alto daño por cortante y la falla combinada de B3FS produjeron la ruptura prematura de la lámina, y una reducción del 65,7% en su aumento de capacidad sobre B3S (3,33%) en relación con la obtenida en B1F sobre B1 (9,7%). La B1F respecto a B1 mostró una resistencia al agrietamiento por cortante relativamente más alta (47,2%) y una más alta rigidez posterior al agrietamiento que B3FS con respecto a B3S, donde un bajo daño por cortante en B1F movilizó completamente sus deformaciones a flexión y rompió su lámina.

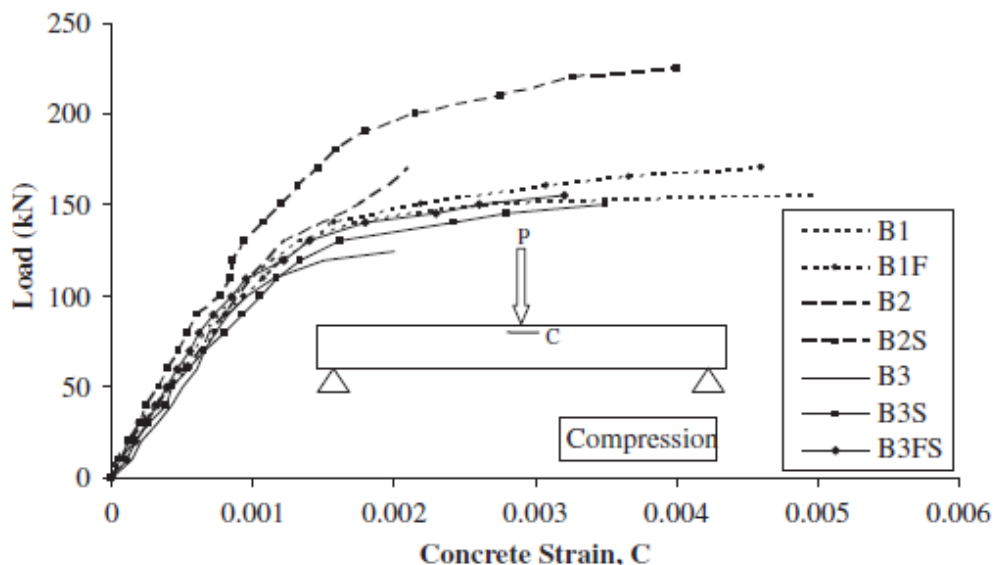


Figura 26. Carga vs Deformación del concreto, respuestas de todas las vigas.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

Las curvas de SC3 y SC8 de carga contra deformación de tracción de los revestimientos en forma de U de B2S, B3S y B3FS, mostradas en la figura 28, reflejan hasta un 22% de activación al fallar. SC3 y SC8 encajan dentro de las regiones B y representan mejor el comportamiento de corte. Una de las razones de la baja activación es el desprendimiento de los revestimientos en U al fallar; en línea con la limitación de la deformación de ACI 440.2R-08. Otra razón es la reducción de la resistencia de las esquinas, donde se produjo una ruptura de la esquina del tercer revestimiento en U de la B2S (cerca de la grieta de falla) con deformación 0,0029 en SC3 (figura 28a). Los revestimientos en U se activaron en el agrietamiento por cortante, con B2S (las barras a flexión más altas) mostrando una mayor carga de agrietamiento y una mayor rigidez posterior al mismo (figura 28a).

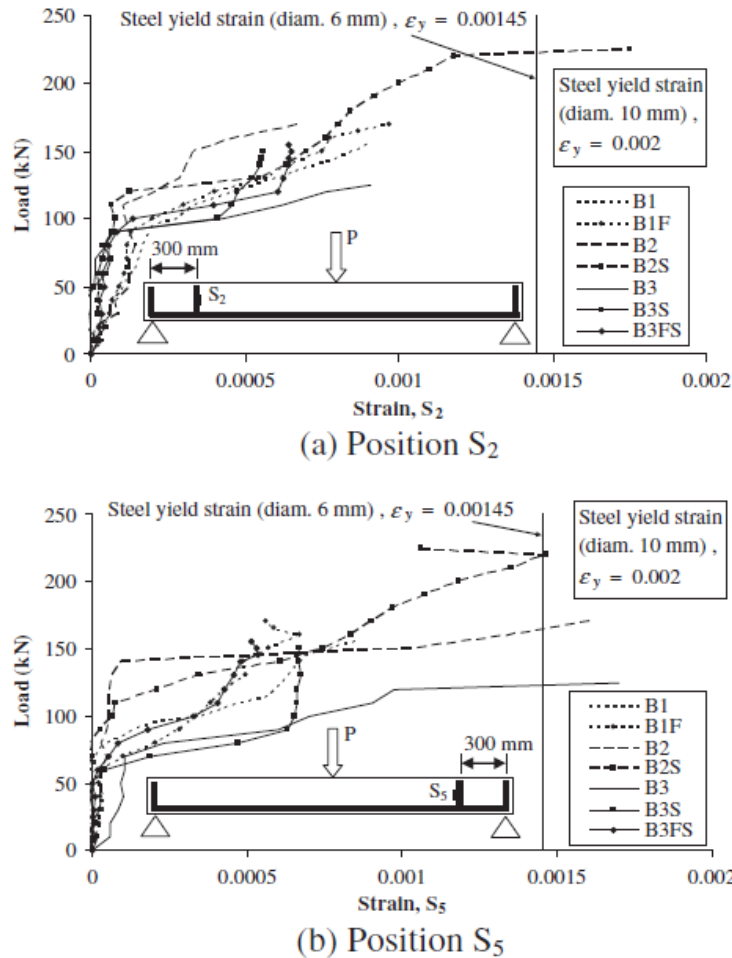


Figura 27. Carga vs Curvas de deformación en los estribos en la posición  $S_2$  y  $S_5$  de todas las vigas reforzadas.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

Las respuestas en SC3 de B3FS y B3S en la figura 28a mostraron una menor carga de agrietamiento (hasta 54,5%) y una menor rigidez posterior al agrietamiento que la B2S. A este respecto, la mayor carga de agrietamiento por cortante en B3FS (20%) y la rigidez post-agrietamiento con respecto a B3S se deben al reforzamiento a flexión. Las respuestas de SC8 en la figura 28b mostraron tendencias similares a las correspondientes respuestas de SC3 en la figura 30a. En la falla B3FS (figura 28b) se observa una deformación en SC8 insignificante de 0,0005

(3,2% de la deformación de rotura del CFRP) debido a la grieta de flexión y la inactivación del revestimiento en U, mientras que una grieta de cortante izquierda activó relativamente la tercera (SC3 en la figura 14a) hasta un valor de deformación de 0,0024 en la falla (15,5% de la deformación de ruptura del CFRP).

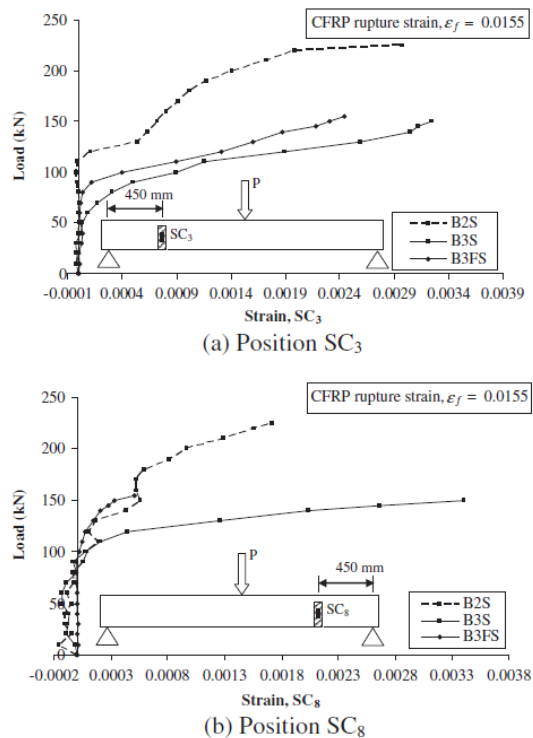


Figura 28. Carga vs Curvas de deformación en los revestimientos en U en la posición SC3 y SC8 de las vigas reforzadas a cortante.

Nota: Adaptado de El-Ghandour, 2011

**5.2.3.6 Análisis de resultados.** Según las pruebas realizadas, se logró determinar que el refuerzo CFRP mejora las propiedades de las vigas, en cuanto a la rigidez y la capacidad de carga, evidencia de estas mejoras se logran observar claramente en (Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015) y (Mostofinejad & Shameli, 2013). A diferencia de experimentos anteriores, en este se logró observar que la efectividad del refuerzo a flexión se puede ver afectada por el daño a cortante que sufre la

viga o viceversa, es decir, la efectividad del refuerzo a cortante se puede ver afectada por el daño a flexión que sufre la viga (figura 19). Grandes fallas a cortante no permiten la completa participación del refuerzo CFRP a flexión llevando a un desprendimiento temprano de la lámina como se puede observar en la figura 20a. Información importante sobre las fallas por desprendimiento de lámina se logró obtener de (Ibars, 2005). Así mismo, en las vigas débiles a flexión, las fisuras y fallas en la zona de flexión ocasionaron el desprendimiento de los revestimientos en U instalados (Figura 20 b, c y d).

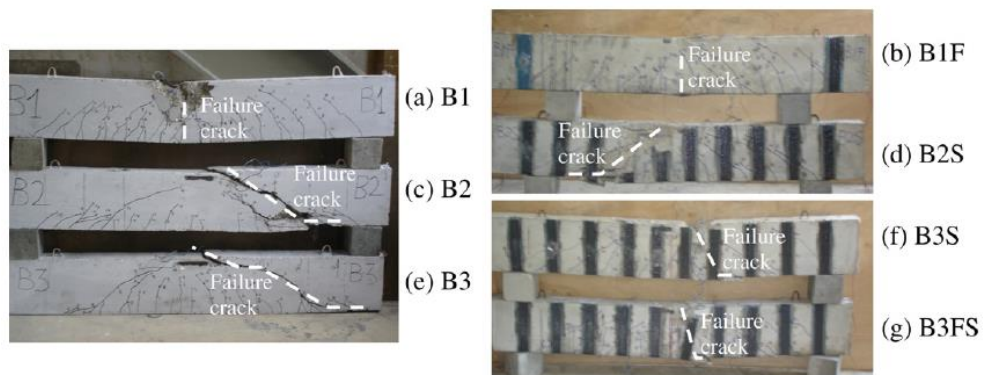


Figura 21. (repetida) – Patrones de fisuras de las vigas probadas a la falla.

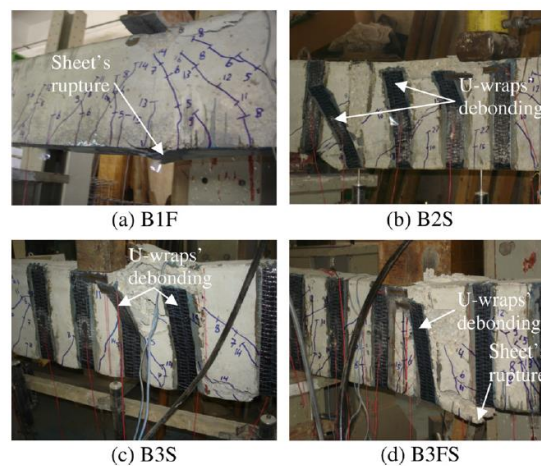


Figura 22. (repetida) – Acercamiento a las fallas de todas las vigas reforzadas.

Con este experimento queda claro que existe una importante conexión entre la configuración inicial de la viga y la manera en que se decida reforzarla con los CFRP, ya que las expectativas iniciales que se puedan tener con el refuerzo se pueden ver disminuidas con fallas relacionadas con aspectos diferentes a los intervenidos directamente.

**5.2.4 Experimento número 4: Artículo “Experimental study of RC jacketed and CFRP strengthened RC beams”** (Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015), *Construction and Building Materials* 95 (páginas 476-485). El programa experimental comprendía la prueba de quince vigas de concreto reforzado. La tabla 7 presenta las propiedades geométricas de los especímenes. Los especímenes fueron inicialmente diseñados como 2100 mm de largo con una sección transversal rectangular, de 250 mm de profundidad y 150 mm de ancho. Basándose en el tamaño de las barras de refuerzo de tracción, los especímenes se dividieron en tres grupos. El primer grupo incluye los especímenes 101-105, en los que se utilizaron dos barras de 10 mm como refuerzo de tracción. Del mismo modo, los especímenes 121 - 125 y 161 - 165 forman, respectivamente, el segundo y tercer grupo, dentro del cual se colocaron barras de 12 mm y 16 mm como refuerzo longitudinal de tracción. En otras palabras, los dos primeros caracteres del nombre de los especímenes se refieren al tamaño de las barras de tracción, y el tercer carácter varía según el método aplicado de refuerzo. En todos los especímenes se colocaron dos barras de 10 mm como refuerzo de compresión. Además, se colocaron estribos cerrados de 10 mm a lo largo de la viga a una distancia de aproximadamente 100 mm para producir suficiente resistencia al corte. El recubrimiento del concreto sobre el refuerzo transversal era de aproximadamente 20 mm.

Como paso inicial de la preparación, los especímenes fueron moldeados de manera que se produjeran cinco vigas de concreto reforzado similares para cada uno de los tres grupos. Uno de los cinco especímenes se dejó sin reforzar para ser utilizado como espécimen de referencia. El uso

de una muestra de referencia en cada grupo facilita la comparación. La figura 29 (a) muestra claramente la disposición de refuerzo en las muestras de referencia. Para aplicar el reforzamiento de FRP, se adhirieron láminas unidireccionales de CFRP en la parte inferior de las vigas. La figura 29 (b) ilustra la disposición de refuerzos en dichos especímenes. Una capa de CFRP refuerza los especímenes 102, 122 y 162, mientras que se usaron dos capas para los especímenes 103, 123 y 163. La Tabla 7 da el área de la sección transversal obtenida de las láminas de CFRP. Adicionalmente, se instaló una lámina de CFRP en U en el extremo de la viga orientado perpendicularmente al CFRP longitudinal para evitar la probable separación de la cubierta del concreto.

Tabla 7.

*Propiedades geométricas de los especímenes.*

Especímenes	Categoría	Sección transversal		Acero de tracción inicial	Acero de tracción de reforzamiento	Acero de compresión	Material CFRP
		b (mm)	h(mm)	As1 (mm <sup>2</sup> )	As2 (mm <sup>2</sup> )	A's (mm <sup>2</sup> )	Af (mm <sup>2</sup> )
<b>101</b>	Espécimen de ref	150	250	157.08 (2 φ 10)	-	157.08 (2 φ 10)	-
<b>102</b>	Con CFRP	150	250	157.08 (2 φ 10)	-	157.08 (2 φ 10)	25.5 (una capa)
<b>103</b>	Con CFRP	150	250	157.08 (2 φ 10)	-	157.08 (2 φ 10)	51 (dos capas)
<b>104</b>	Con encamisado	250	300	157.08 (2 φ 10)	100.53 (2 φ 8)	157.08 (2 φ 10)	-
<b>105</b>	Con encamisado	250	300	157.08 (2 φ 10)	157.08 (2 φ 10)	157.08 (2 φ 10)	-
<b>121</b>	Espécimen de ref	150	250	226.20 (2 φ 12)	-	157.08 (2 φ 10)	-
<b>122</b>	Con CFRP	150	250	226.20 (2 φ 12)	-	157.08 (2 φ 10)	25.5 (una capa)
<b>123</b>	Con CFRP	150	250	226.20 (2 φ 12)	-	157.08 (2 φ 10)	51 (dos capas)

Especímenes	Categoría	Sección transversal		Acero de tracción inicial	Acero de tracción de reforzamiento	Acero de compresión	Material CFRP
		b (mm)	h(mm)	As1 (mm <sup>2</sup> )	As2 (mm <sup>2</sup> )	A's (mm <sup>2</sup> )	Af (mm <sup>2</sup> )
<b>124</b>	Con encamisado	250	300	226.20 (2 φ 12)	100.53 (2 φ 8)	157.08 (2 φ 10)	-
<b>125</b>	Con encamisado	250	300	226.20 (2 φ 12)	157.08 (2 φ 10)	157.08 (2 φ 10)	-
<b>161</b>	Espécimen de ref	150	250	402.12 (2 φ 16)	-	157.08 (2 φ 10)	-
<b>162</b>	Con CFRP	150	250	402.12 (2 φ 16)	-	157.08 (2 φ 10)	25.5 (una capa)
<b>163</b>	Con CFRP	150	250	402.12 (2 φ 16)	-	157.08 (2 φ 10)	51 (dos capas)
<b>164</b>	Con encamisado	250	300	402.12 (2 φ 16)	100.53 (2 φ 8)	157.08 (2 φ 10)	-
<b>165</b>	Con encamisado	250	300	402.12 (2 φ 16)	157.08 (2 φ 10)	157.08 (2 φ 10)	-

Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015

El encamisado de concreto reforzado se aplicó a otros dos de los cinco especímenes en cada grupo, es decir, los especímenes 104, 105, 124, 125, 164 y 165. Encamisado de concreto en forma de U se usó para ampliar la sección transversal de la viga de 250\_150 mm a 300\_250 mm, como se muestra en la figura 29 (c). Se instalaron conectores de cortante en forma de Z en la cara de tensión a una distancia de aproximadamente 400 mm a lo largo de la viga. Estos conectores de cortante junto con la rugosidad de la superficie estaban dirigidos al establecimiento de suficiente continuidad entre capas de concreto. Además, se pasaron barras de acero de 10 mm a través de la viga de concreto reforzado inicial a una distancia de aproximadamente 200 mm y se doblaron de tal manera que se obtuvo una forma de U como la parte superior de cada barra de acero transversal. También se unió otra barra de acero en forma de U, que actúa como la parte inferior; Sin embargo, la longitud de anclaje entre dos formas en U se desarrolló parcialmente. Posteriormente, se

colocaron dos barras de acero longitudinales en la esquina de los refuerzos transversales. Como paso final, el concreto premezclado se vertió cuidadosamente en un molde de acero.

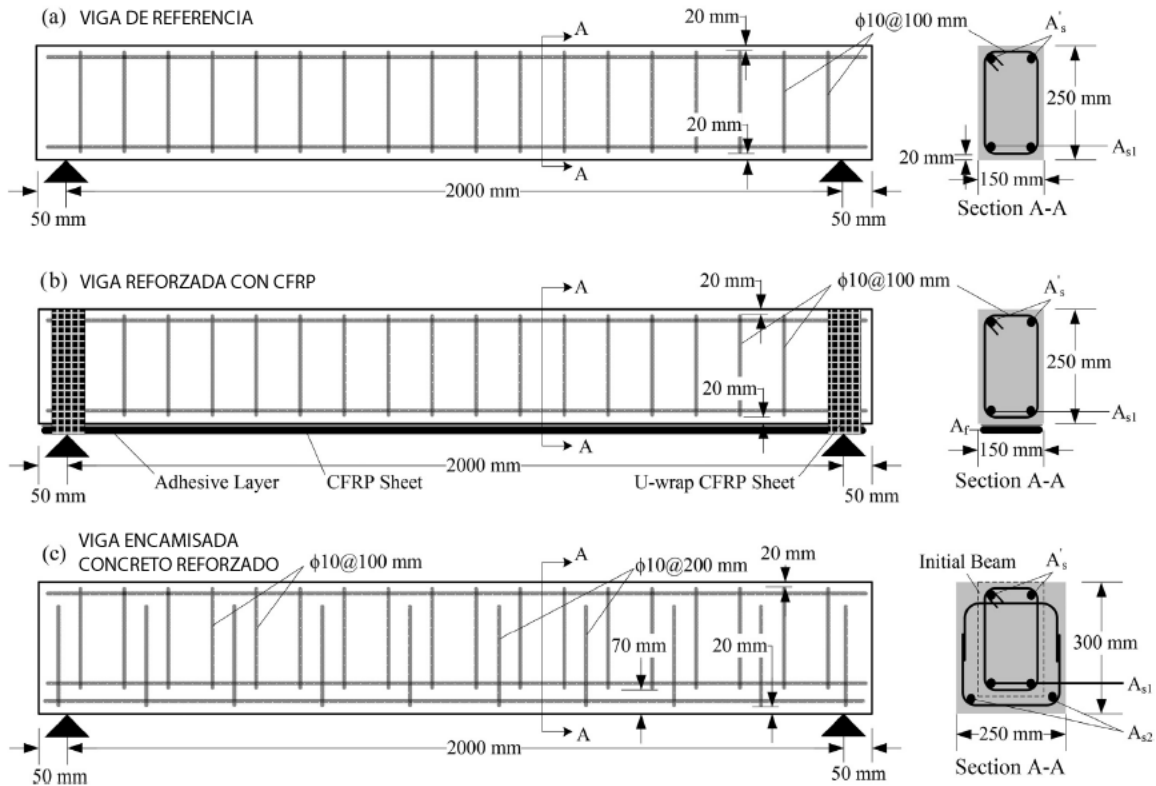


Figura 29. Dimensiones y configuración del refuerzo en las vigas.

Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015

**5.2.4.1 Comportamiento de los materiales.** Se realizaron ensayos de compresión uniaxial sobre los especímenes cilíndricos estándar. En promedio, la resistencia a la compresión del hormigón se midió 31 MPa después de 28 días de endurecimiento del concreto. La resistencia a la compresión durante el experimento de las vigas también midió aproximadamente 33 MPa en promedio. La resistencia de fluencia nominal de las barras longitudinales y transversales de acero es 300 y 400 MPa, respectivamente. Sin embargo, las propiedades mecánicas de las barras de refuerzo fueron obtenidas de las pruebas de tensión uniaxial estándar, tal como se presentaron en la tabla 8. La

tabla 8 representa las propiedades mecánicas de las láminas de CFRP, así como las resinas epoxi resina. El espesor típico de las láminas CFRP fue de 1,7 mm colocado a lo largo de la viga.

**5.2.4.2 Configuración de la prueba.** La figura 30 representa la instalación de pruebas ejecutada en el laboratorio de piso fuerte ubicado en la Universidad de Tecnología de Sharif. Los experimentos se llevaron a cabo con control de desplazamiento continuo más allá de una deflexión de mitad de luz igual a 80 mm. Un actuador con una capacidad de carga estática de 280 kN aplicó el desplazamiento a mitad del tramo con una velocidad de carga cuasi-estática aproximadamente igual a 2 mm/min. Los cojinetes de rodillos permitieron que la viga girara libremente y produjeron la fijación vertical requerida. La carga y el desplazamiento aplicados a la mitad de la viga se midieron durante los experimentos.

Tabla 8.

*Propiedades mecánicas de los materiales.*

<b>Material</b>	<b>Módulo elástico (GPa)</b>	<b>Módulo de rotura (GPa)</b>	<b>Tensión de fluencia (MPa)</b>	<b>Tensión última (MPa)</b>	<b>Deformación última (%)</b>
Refuerzo long (A-III)	207	-	340	680	18
Refuerzo transversal (A-II)	209	-	530	700	23
Sika wrap hex - 300C	230	-	-	3900	1.7
FRPoxy G400	3500	2800	-	30	-

Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015



Figura 30. Carga de 3 puntos.

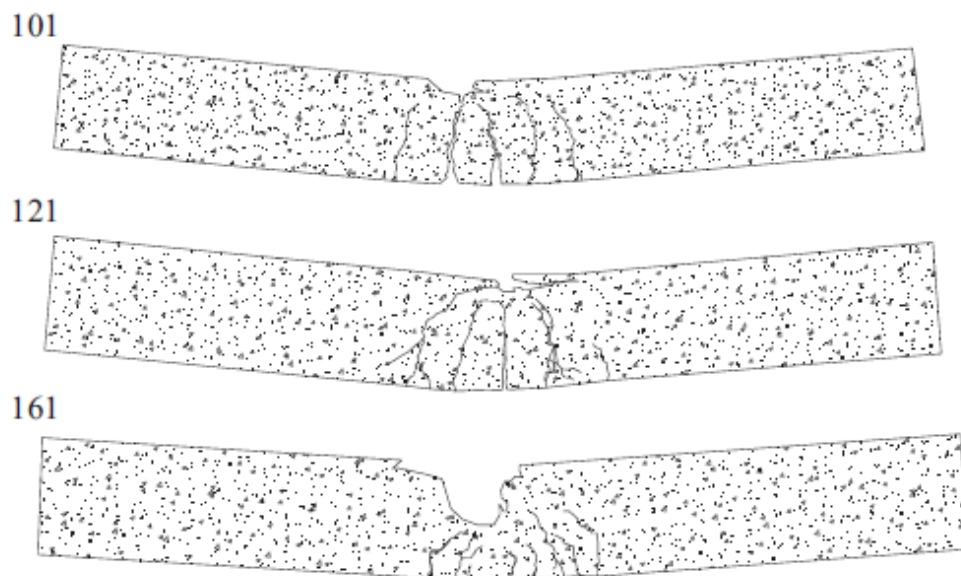
Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015

### 5.2.4.3 Resultados

5.2.4.3.1 *Especímenes de referencia.* Los especímenes de referencia fueron diseñados con un valor de cuantía de refuerzo longitudinal inferior al acero mínimo propuesto por el ACI 318M-08. Por lo tanto, se puede predecir que el refuerzo de tracción entrará en fluencia antes de que ocurra aplastamiento en el concreto. Además, también se utilizó suficiente armadura transversal haciendo que el fallo por cortante fuera menos probable. La carga de tres puntos induce una combinación de cortante y flexión en las vigas. Micro fisuras se formaron cerca del tramo intermedio poco después del inicio de la carga, extendiéndose en su mayor parte en dirección vertical. Al aplicar una carga adicional, el ancho de las fisuras aumenta considerablemente convirtiéndose en una posible falla a flexión. Con el tiempo, el aplastamiento del concreto prevalece a medida que aumenta la deflexión

en el centro de la viga. Los patrones de propagación de grietas observados se representan en la figura 31 para las vigas de referencia.

La figura 32 muestra las curvas de carga-deflexión de las vigas de referencia. Antes de la fluencia de las barras de acero, la carga aplicada y la deflexión aumentaron con un gradiente fuerte. Sin embargo, después de entrar en fluencia el refuerzo de tracción, la carga aplicada permaneció casi constante hasta que disminuyó considerablemente una vez que el concreto sufrió de aplastamiento por compresión. Haciendo referencia a la figura 32, se logró concluir fácilmente que las vigas con otras relaciones de acero a tracción presentan una resistencia superior.



*Figura 31. Patrón de propagación de fisuras en las vigas de referencia*

*Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015*

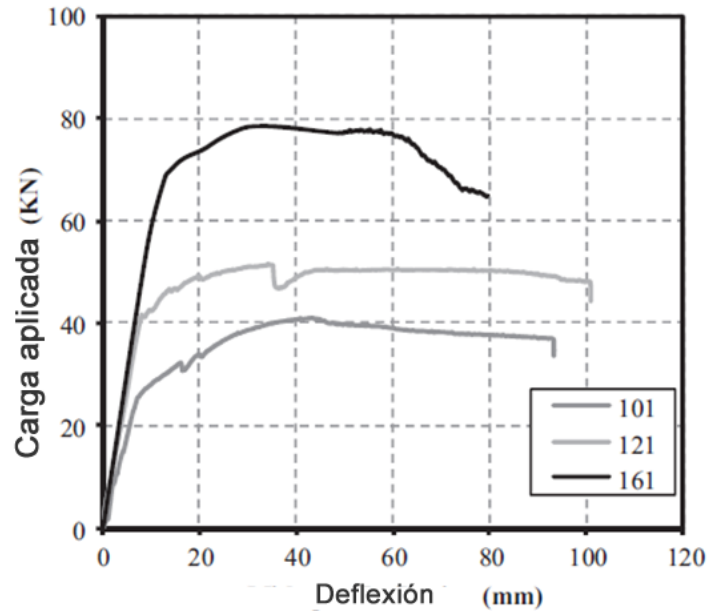


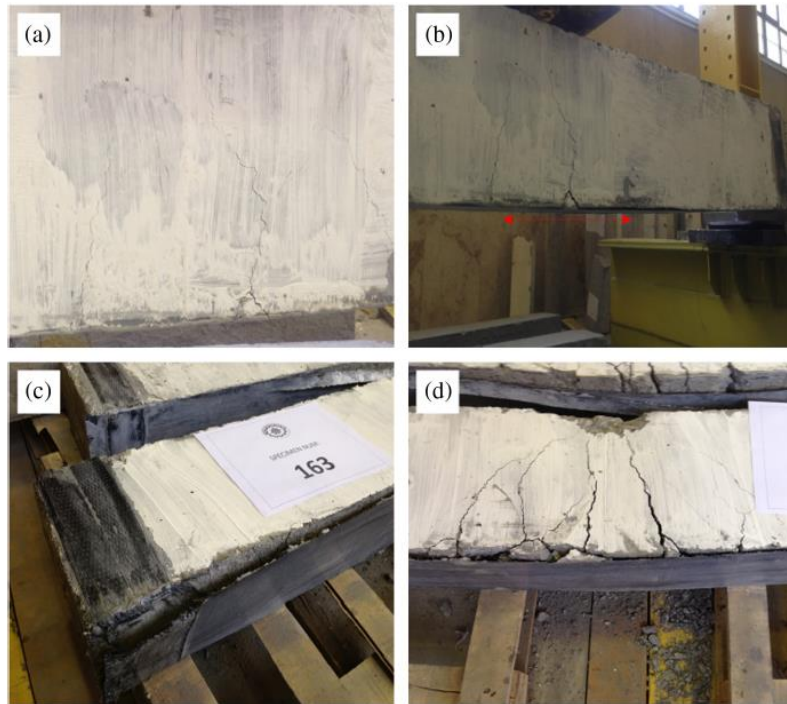
Figura 32. Carga (kN) vs Deflexión (mm) en vigas de referencia

Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015

5.2.4.3.2 *Vigas reforzadas con CFRP*. Se observó la formación de micro-fisuras en la zona a tracción cerca a la parte central de la luz de la viga, como era esperado. La figura 33 (a) muestra claramente las micro-fisuras. El ancho de las grietas aumenta a medida que la viga se somete a más deflexión. Esto induce algunas grietas agudas en el centro, que provocan una concentración intensa de la tensión-deformación adyacente a las láminas. Esta zona de alta tensión también se extiende hacia el soporte a medida que las grietas crecen gradualmente como se puede ver en la figura 33 (b). La ruptura del revestimiento en U prevalece eventualmente, como se muestra en la figura 33 (c). En efecto, las grietas de flexión a media luz forman una punta de fisura entre el concreto y la capa adhesiva, que crece hacia el extremo de la viga, dando como resultado el desprendimiento total del laminado. Después de la separación de las láminas de CFRP, las grietas de flexión crecen extensamente en un patrón similar al observado en las vigas de referencia. Este mecanismo de falla

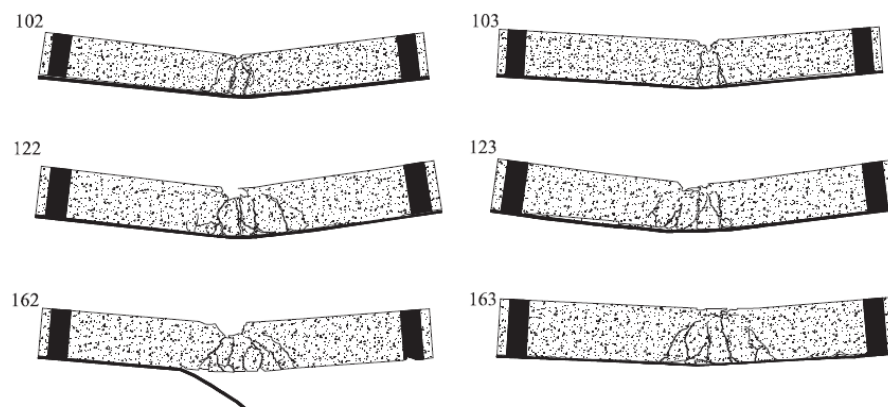
se introdujo previamente y se identificó como "desprendimiento intermedio inducido por fisura" por Teng et al.

La figura 33 (d) muestra que una fina capa de concreto se separó y quedó pegada al laminado desprendido. Esto indica que el sustrato de concreto era el elemento más débil para desprenderse a pesar de preparar adecuadamente las superficies. Obsérvese que todos los seis especímenes reforzados con CFRP fallaron por igual, para los cuales el patrón de fisura se muestra en la figura 34. La figura 35 muestra el comportamiento de carga-deflexión de las vigas reforzadas CFRP junto con las vigas de referencia correspondientes. Según esta figura (figura 35), esta técnica aumenta notablemente la capacidad de carga total de las vigas. Sin embargo, el mecanismo de desprendimiento provoca una notable disminución de la fuerza. Además, las curvas de carga-deflexión casi coinciden con la curva de la viga de referencia cuando se inicia el desprendimiento. Los experimentos también indican que el aumento de las capas de CFRP mejora aún más la resistencia. Sin embargo, la deflexión en el centro correspondiente a la carga máxima fue relativamente pequeña, lo que se discutirá en las siguientes secciones.



*Figura 33* (a) Formación de micro fisuras en el centro, (b) Propagación de las fisuras hacia los apoyos, (c) Ruptura de revestimiento en U del final, (d) Falla por desprendimiento del CFRP

*Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015*



*Figura 34.* Patrón de propagación de fisuras en las vigas reforzadas con CFRP

*Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015*

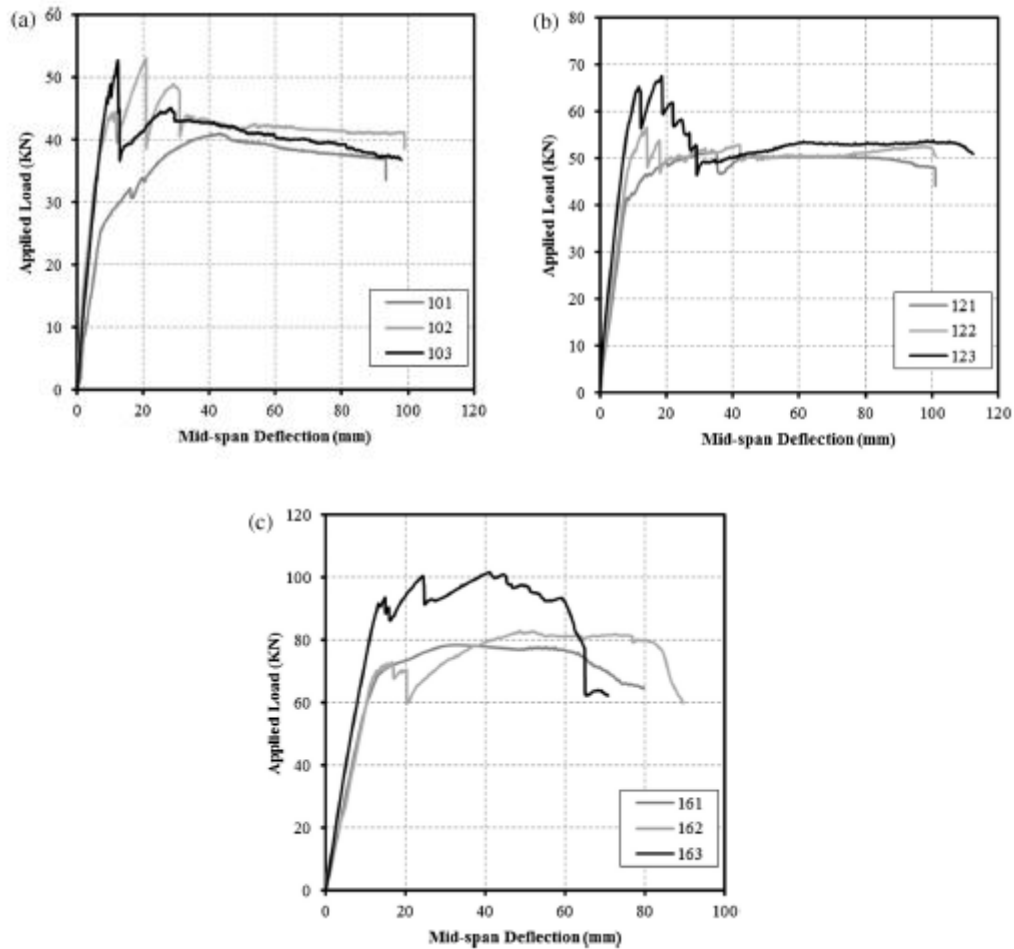


Figura 35. Comportamiento Carga-Deflexión de las vigas reforzadas con CFRP

Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015

5.2.4.3.3 *Vigas encamisadas con concreto reforzado.* La figura 36 muestra el crecimiento de grietas en las vigas encamisadas. Se observó que las grietas de tracción aparecen adyacentes a la zona central con una deflexión relativamente pequeña. Estas grietas crecen gradualmente hacia el lado de la viga que está a compresión. Posteriormente, el inicio del fenómeno de fluencia es lo que ocasiona esta disminución de la rigidez; Sin embargo, las muestras todavía pueden experimentar cargas y deflexiones adicionales hasta que el concreto se aplaste. Como se muestra en la figura 36 prevalece un fallo de flexión favorable en todas las vigas con encamisado que presentan un patrón

de fisuración notablemente similar a las vigas de referencia (figura 31). Por lo tanto, se puede concluir que este método no cambia el modo de fallo predominante, lo que puede ser destacado como una ventaja considerable.

Con el fin de asegurar la continuidad entre el sustrato de concreto y el encamisado, después de los ensayos, los encamisados fueron parcialmente retirados, y la formación de grietas en la sección inicial se observó claramente. La figura 37 muestra una formación extensa de grietas en la viga inicial en la muestra 125. Observaciones similares se hicieron para las otras vigas encamisadas. Como resultado, se puede concluir que los conectores de cortante en forma de Z junto con la rugosidad de la superficie establecen un enlace suficiente entre capas de concreto. La figura 38 muestra curvas de carga-deformación de las vigas encamisadas en comparación con las muestras de referencia. Por consiguiente, el encamisado utilizado mejora significativamente la capacidad de carga. Los especímenes exhiben un comportamiento de carga-deformación lineal antes de la fluencia de las barras de acero de tracción. Las vigas soportan cargas adicionales en un gradiente inferior antes del fallo del concreto por compresión, y esta falla induce una disminución notable en la pendiente de las curvas de carga-deflexión. Sin embargo, se pueden aplicar cargas adicionales que se pueden atribuir a la resistencia restante a la compresión del concreto o al comportamiento de endurecimiento. Obsérvese que el aumento en el área transversal de las barras de tracción aumentaría la resistencia. Además, como se muestra claramente en la figura 38, la resistencia de post-fluencia de las vigas es notablemente mayor que la de los especímenes de referencia. Los resultados de las pruebas se pueden ver en las tablas 09, 10, 11.

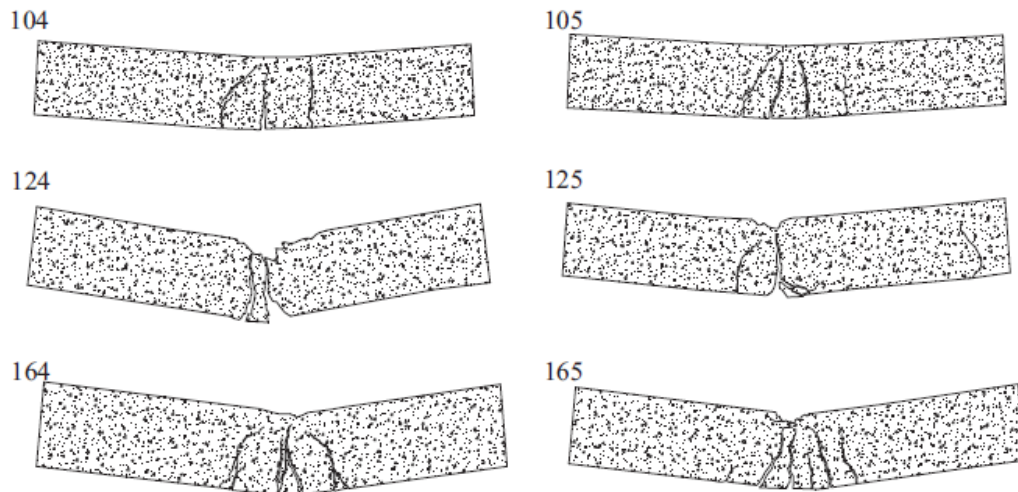


Figura 36. Patrón de propagación de fisuras observado en las vigas encamisadas  
Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015



Figura 37. Formación de fisuras en la parte central de la viga inicial que fue encamisada.  
Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015

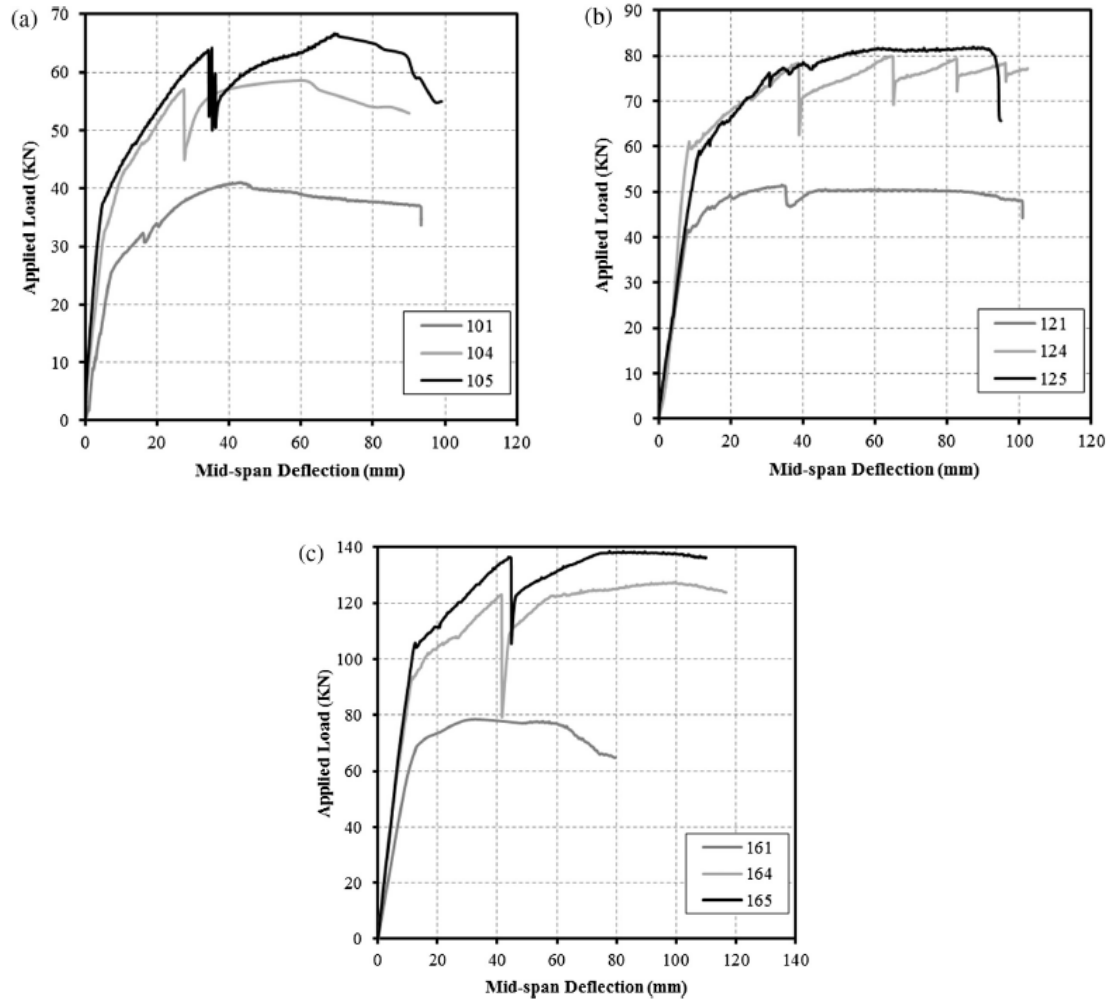


Figura 38. Comportamiento Carga-Deflexión de las vigas encamisadas

Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015

Tabla 9.

*Detección de fallas en los experimentos.*

Especímene	Modo de falla	Primera fisura en la cara de tensión	Inicio del desprendimiento		Inicio del aplastamiento		
		Momento (kN.m)	Deflexión en el centro (mm)	Momento (kN.m)	Deflexión en el centro (mm)	Momento (kN.m)	Deflexión en el centro (mm)
101	Ruptura del concreto	13.72	9.4	-	-	No disponible	No disponible
102	Desprendimiento del CFRP	17	5.9	21.5	12	21	48.6
103	Desprendimiento del CFRP	18.2	6.55	23.42	9.38	21.15	44.7
104	Ruptura del concreto	17.5	5	-	-	26.66	45.7
105	Ruptura del concreto	19.35	6.07	-	-	31.5	55.3
121	Ruptura del concreto	17.95	6.9	-	-	25.35	27.87
122	Desprendimiento del CFRP	21.9	7.62	27.5	14	26.27	40.22
123	Desprendimiento del CFRP	31.8	10.85	28.95	8.9	24.59	30.89
124	Ruptura del concreto	26.46	7.36	-	-	36.66	45.7
125	Ruptura del concreto	29.4	11.8	-	-	40.65	59.2
161	Ruptura del concreto	27.35	9.11	-	-	34.74	13.54
162	Desprendimiento del CFRP	34.45	11.97	36.1	14.9	36.67	30.4
163	Desprendimiento del CFRP	35	9.62	30	7.8	No disponible	No disponible
164	Ruptura del concreto	40	9	-	-	63.45	91.59
165	Ruptura del concreto	41	9	-	-	69.3	77.6

Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, &amp; Raisi, 2015

Tabla 10.

*Evaluación de las técnicas de reforzamiento.*

Especímenes	Momento máximo (kN.m)			Deflexión en el máximo momento (mm)			Energía disipada (N.m)		
	Reforzada	Referencia	Ratio	Reforzada	Referencia	Ratio	Reforzada	Referencia	Ratio
<b>102</b>	26.03	20.51	1.27	20.9	43.41	0.48	3739.06	3182.81	1.17
<b>103</b>	26.58	20.51	1.30	12.06	43.41	0.28	3585.4	3182.81	1.13
<b>104</b>	29	20.51	1.41	60	43.41	1.38	4676.04	3182.81	1.47
<b>105</b>	33.3	20.51	1.62	69	43.41	1.59	5120	3182.81	1.61
<b>122</b>	28.34	25.6	1.11	14.16	33.12	0.43	4381.85	4234.05	1.03
<b>123</b>	33.8	25.6	1.32	18.6	33.12	0.56	4682.67	4234.05	1.11
<b>124</b>	39.95	25.6	1.56	64.13	33.12	1.94	6235.33	4234.05	1.47
<b>125</b>	40.8	25.6	1.59	61	33.12	1.84	6427.47	4234.05	1.52
<b>162</b>	41.5	39.25	1.06	48.6	32.28	1.51	4880.25	5108.83	0.96
<b>163</b>	50.75	39.25	1.29	41.21	32.28	1.28	5878.25	5108.83	1.15
<b>164</b>	63.7	39.25	1.62	99	32.28	3.07	7217.06	5108.83	1.41
<b>165</b>	69.3	39.25	1.77	77.6	32.28	2.40	7906.21	5108.83	1.55

*Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015*

Tabla 11.

*Resultados analíticos vs Resultados de experimentos.*

Especímenes	Ast/Asb	Fuerza Cortante (kN)		Momento último (kN.m)		
		Capacidad	Aplicada	Experimental	Analítico	Error %
<i>Vigas de referencia</i>						
<b>102</b>	0.13	131.23	20.51	14.97	20.51	27.00%
<b>121</b>	0.188	131.23	25.60	18.55	25.6	27.54%
<b>161</b>	0.334	131.23	39.25	31.37	39.25	20.08%
<b>Error promedio</b>						<b>24.87%</b>
<i>Vigas con CFRP</i>						
<b>102</b>	0.133	131.23	26.03	26.02	26.03	0.02%
<b>103</b>	0.133	131.23	26.58	31.18	26.58	17.33%
<b>122</b>	0.188	131.23	28.34	31.24	28.34	10.25%
<b>123</b>	0.188	131.23	33.80	36.46	33.8	7.87%
<b>162</b>	0.334	131.23	41.50	44.09	41.5	6.24%
<b>163</b>	0.334	131.23	50.75	48.8	50.75	3.84%

Especímenes	Ast/Asb	Fuerza Cortante (kN)		Momento último (kN.m)		
		Capacidad Aplicada	Experimental	Analítico	Error %	
<b>Error promedio</b>						
<b>7.59%</b>						
<i>Vigas encamisadas</i>						
<b>104</b>	0.075	300.03	29.00	23.97	29	17.34%
<b>105</b>	0.075	300.03	33.30	29.33	33.3	11.92%
<b>124</b>	0.107	300.03	39.95	29.14	39.95	27.06%
<b>125</b>	0.107	300.03	40.80	34.48	40.8	15.49%
<b>164</b>	0.191	300.03	63.70	42.16	63.7	33.81%
<b>165</b>	0.191	300.03	69.30	47.42	69.3	31.57%
<b>Error promedio</b>						
<b>22.87%</b>						

Nota: Adaptado de Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015

**5.2.4.4 Análisis de resultados.** Según los resultados obtenidos en este experimento, se logró observar que el refuerzo CFRP fallo por desprendimiento, imposibilitando el total desarrollo de la lámina. También, los resultados mostraron que después del desprendimiento, la fuerza de la viga cae de forma considerable, lo cual no es un comportamiento deseable. Comparada con la viga reforzada encamisada, las vigas reforzadas con CFRP, que sufren el desprendimiento de las láminas, permiten menores deformaciones, limitando así la disipación de energía como se puede observar también en (Mostofinejad & Shameli, 2013).

En cuanto a las vigas reforzadas con encamisado de concreto, la falla que dominó en el experimento fue la ruptura del concreto por falla a flexión, lo cual es favorable porque permite un completo desarrollo de la fuerza tanto del concreto como del acero de refuerzo como se puede observar también en (Altun, 2004). Adicionalmente, se mejora la resistencia a flexión y cortante lo que permite mayor ductilidad y mayor disipación de energía.

Comparativamente, aunque ambas técnicas mejoran las condiciones iniciales de la viga, en este experimento, claramente la técnica del encamisado de concreto reforzado presenta mejores resultados. Sin embargo, el refuerzo con CFRP presenta una alternativa novedosa y rápida para intervenir estructuras, lo que es una gran ventaja ya que su instalación requiere de un tiempo mucho menor y la técnica utilizada es menos invasiva.

## **6. Refuerzo con CFRP a cortante en vigas.**

### **6.1 Refuerzo a cortante con los métodos: dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa**

Las características deseables de los CFRP tales como su elevada relación de rigidez a peso, alta durabilidad ambiental, alta resistencia a la tracción y facilidad de aplicación han llevado a su uso como una alternativa a los materiales convencionales utilizados para el refuerzo a cortante y flexión, como también para la rehabilitación de elementos de concreto armado para aumentar su capacidad de carga y mejorar su capacidad de servicio. EBR es un método utilizado ampliamente para el refuerzo a cortante y flexión de vigas de concreto reforzado con compuestos CFRP. Al igual que en el refuerzo a flexión, la preparación de la superficie juega un papel importante en el desempeño final del refuerzo con CFRP. De acuerdo a la investigación de (Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016).

En (Bashir H. Osman, 2016) se puede observar que la presencia de refuerzos de FRP modifica las inclinaciones de las grietas y puntales, las tensiones de confinamiento de concreto, y otros parámetros relacionados con la respuesta de cortante. Esto produce directamente una interacción

entre el concreto, el acero interno y los componentes de FRP en la resistencia al corte. Vale la pena anotar que al igual que en flexión, el principal problema es el desprendimiento del refuerzo CFRP. Este concepto se explica un poco más en (G.M. Chen Z. Z., 2016) donde se puede ver que después del desprendimiento del FRP, una fina capa de concreto suele estar unida a la superficie desprendida de FRP, mostrando que el desprendimiento se produce realmente en el concreto. Cuando la separación de FRP es el modo de fallo que gobierna, la tensión máxima de FRP es controlada por la tensión de desprendimiento (o deformación) determinada por la resistencia de la unión de la interfase FRP-concreto, que en general es significativamente menor que la resistencia del FRP. Además, el fallo por desprendimiento de FRP es bastante frágil: el fallo generalmente ocurre de una manera catastrófica a una deformación estructural relativamente pequeña, que es indeseable en términos de diseño de estructura.

En este documento, los métodos de revestimiento estudiados y comparados fueron: Dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa. En (G.M. Chen J. T., 2012) se resalta que la resistencia a cortante de las vigas de concreto reforzado se puede mejorar mediante el uso de FRP. El refuerzo FRP puede unirse alrededor de toda la sección (de vuelta completa), así como revestimiento en U y a dos lados. Así mismo (Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016) demostró que las técnicas mencionadas combinadas con el método EBRIG permiten alcanzar mejores resultados que con otros métodos.

## **6.2 Configuración de los experimentos**

**6.2.1 Experimento número 1: Artículo “Influence of different bonding and wrapping techniques on performance of beams strengthened in shear using CFRP reinforcement”** (Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016), *Construction and Building Materials* 116 (páginas 310-

320). Para comparar los diferentes métodos de reforzamiento a cortante de miembros de concreto reforzado con láminas CFRP, se fabricaron 7 vigas de tamaño 120 x 160 x 1400 mm y se clasificaron en cuatro grupos, uno el grupo control y tres otros grupos en los que se incluyeron las vigas reforzadas mediante el método EBR o el método EBRIG. Se consideró un espacio de cortante de 340 mm para todos los especímenes de acuerdo con la recomendación ACI 318-14 para prevenir la falla profunda de la viga.

Para investigar el comportamiento de corte de las vigas y su fallo a flexión, se diseñaron y reforzaron los especímenes con dos barras de acero de 18 mm de diámetro tanto en la zona de tensión como en la de compresión. Se midió una resistencia a la fluencia de aproximadamente 520 MPa sobre las barras de refuerzo de flexión de tensión y compresión. Los resultados de la investigación han indicado que mediante la ampliación de los espacios entre los estribos en las vigas que se han reforzado con el método EBR, la acción resistente al cortante del CFRP aumenta significativamente y el rendimiento del método EBR para el refuerzo por cortante puede ser investigado eficazmente. Por otra parte, el uso de compuestos CFRP para el reforzamiento de corte de vigas de concreto reforzado es más eficaz en la ausencia de estribos internos. Por lo tanto, en este estudio no se usaron estribos de acero en los especímenes como refuerzo de corte para aprovechar la capacidad de corte total de las hojas de CFRP.

La capacidad de flexión calculada de los especímenes con el refuerzo utilizado es de 28,2 kN-m, que corresponde a una carga de falla de aproximadamente 170 kN. Además, la capacidad de corte calculada para los especímenes sin reforzamiento externo de CFRP se relaciona con la capacidad del concreto y se evalúa en un mínimo de 17,0 kN. Por otro lado, cuando se utiliza un refuerzo de corte diferente, no se puede realizar un cálculo fiable considerando la condición de desprendimiento para los métodos EBR y EBRIG, también la tensión final alcanzable en las hojas

CFRP hechas mediante procedimiento en seco (que se basa severamente en la mano de obra Y la condición ambiental) no son predecibles.

El presente trabajo proporciona los resultados de un estudio experimental en el que se instalaron láminas CFRP en vigas en las tres configuraciones típicas de envoltura lateral de dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa, usadas para los métodos EBR y EBRIG sobre ranuras verticales y diagonales. También se investigan los efectos de estas configuraciones y los métodos utilizados para el reforzamiento a cortante de las vigas de concreto reforzado sobre su capacidad de carga, absorción de energía, desprendimiento de láminas de FRP y mecanismos de falla finales.

#### ***6.2.1.1 Aplicación de CFRP por procedimiento en seco***

*6.2.1.1.1 Especímenes reforzados con el método EBR.* Para el refuerzo a cortante de las vigas usando el método EBR convencional, la capa débil de la superficie del concreto se retiró inicialmente usando una máquina de rectificar y la superficie se limpió por presión de aire.

*6.2.1.1.2 Especímenes reforzados con el método EBRIG.* Para el refuerzo a cortante de las vigas mediante el método EBRIG, se marcaron las ubicaciones de las ranuras verticales y diagonales en los lados laterales de las vigas de concreto y las ranuras se hicieron posteriormente a anchuras y profundidades adecuadas. Los especímenes fueron curados a una temperatura fija de 20 ° C durante 7 días para asegurar la unión adecuada entre las capas CFRP y el sustrato de concreto.

*6.2.1.2 Clasificación de los especímenes.* Las vigas de ensayo incluyeron 7 especímenes diseñados para aproximarse a la falla por cortante deseada. Una proporción de capacidad de corte-flexión de 2,5 fue provisionado en los especímenes para investigar el comportamiento preciso de

cortante de las vigas reforzadas con compuestos CFRP de acuerdo a los códigos ACI 440.2R-08 y ACI318-14. Las vigas se reforzaron mediante los métodos EBR y EBRIG con láminas verticales y diagonales de CFRP. De acuerdo con el código ACI 440.2R-08, se dejó un espacio libre de menos de  $d/4$  igual a 30 mm entre las tiras de CFRP en los especímenes de todos los grupos de ensayo excepto en los del grupo C. Los métodos de refuerzo se designaron como EBR-V, EBR-D, EBRIG-V y EBRIG-D como se muestra en la tabla 12. Los efectos de los procedimientos de envoltura de dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa (los detalles de estos métodos de envoltura son mostrados en la figura 1) y también se investigó la influencia vertical y diagonal de los refuerzos CFRP en la absorción de energía, el aumento de la capacidad de carga final y la deflexión de la muestra. Los especímenes se clasificaron en los siguientes 4 grupos diferentes. Los detalles de los especímenes se presentan en la tabla 12.

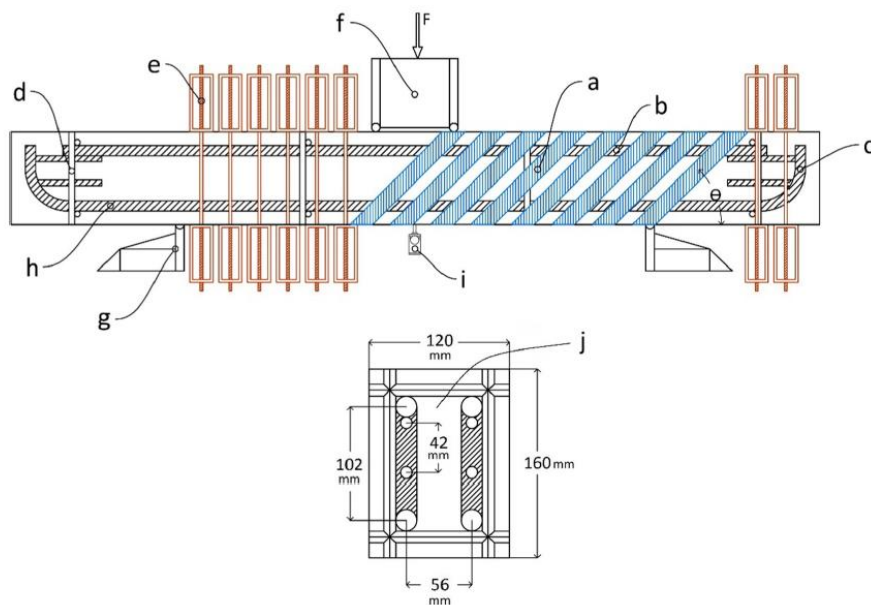
#### **- Grupo A**

Este grupo incluía dos vigas que se sometieron a cuatro ensayos aprovechando un sistema de anclaje en el que se aplicó refuerzo de acero externo sobre el intervalo de cortante que no se sometió a carga, esta configuración se puede ver en la figura 39. Se reforzaron cuatro vigas con hojas CFRP utilizando el método EBR o EBRIG. Las bandas CFRP se instalaron vertical y diagonalmente en un ángulo de  $45^\circ$  con respecto al eje de la viga, tal como se observa en la figura 40. Los especímenes de este grupo se reforzaron con tiras de CFRP usando el método de envoltura de dos lados, con anchos idénticos de CFRP ( $W_f$ ) y cantidades idénticas. Debe tenerse en cuenta que la anchura de las tiras CFRP en el método EBR en todos los grupos se adoptó de acuerdo con los códigos ACI 440.2R-08 y ACI318-14 para asegurar la falla a cortante deseada.

#### **- Grupo B**

Este grupo consistió en dos vigas diseñadas y cuatro pruebas llevadas a cabo aprovechando un sistema de anclaje externo como se mencionó anteriormente. Los especímenes incluyeron cuatro

vigas reforzadas con hojas CFRP a través de los métodos EBR y EBRIG aplicando las tiras de CFRP vertical y diagonalmente en un ángulo de  $45^\circ$  con el eje de la viga, tal como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Los especímenes de este grupo se reforzaron con tiras de CFRP usando la técnica de revestimiento en U con un intervalo de centro a centro idéntico entre las tiras de CFRP ( $S_f$ ) y diferentes cantidades de CFRP.



*Figura 39.* Configuración de la configuración de prueba y detalles del refuerzo. (a) compuestos de CFRP; (b) refuerzo de acero a compresión; (c) sistema combinado de anclaje; (d) separador de barras de acero; (e) Sistema de anclaje externo; (f) sistema de transferencia de carga; (g) soportes; (h) armadura de acero a tracción; (i) LVDT; (j) sección transversal de la viga.

*Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016*

### - Grupo C

Este grupo consistió en dos vigas de muestra incluidas cuatro vigas de prueba que se reforzaron con hojas de CFRP a través del EBR o el método de EBRIG aplicando tiras de CFRP vertical y

diagonalmente en un ángulo de  $45^\circ$  al eje de la viga como se observa en figura 40. El intervalo entre las tiras CFRP en este grupo fue mayor que  $d/4$  e igual a 50 mm.

### - Grupo D

Este grupo consistió en una viga y dos pruebas conducidas. Los especímenes consistían en dos vigas de control que carecían de cualquier refuerzo de CFRP. Se utilizaron para la comparación con especímenes reforzados mediante los métodos EBR y EBRIG en el grupo A y los grupos B y C.

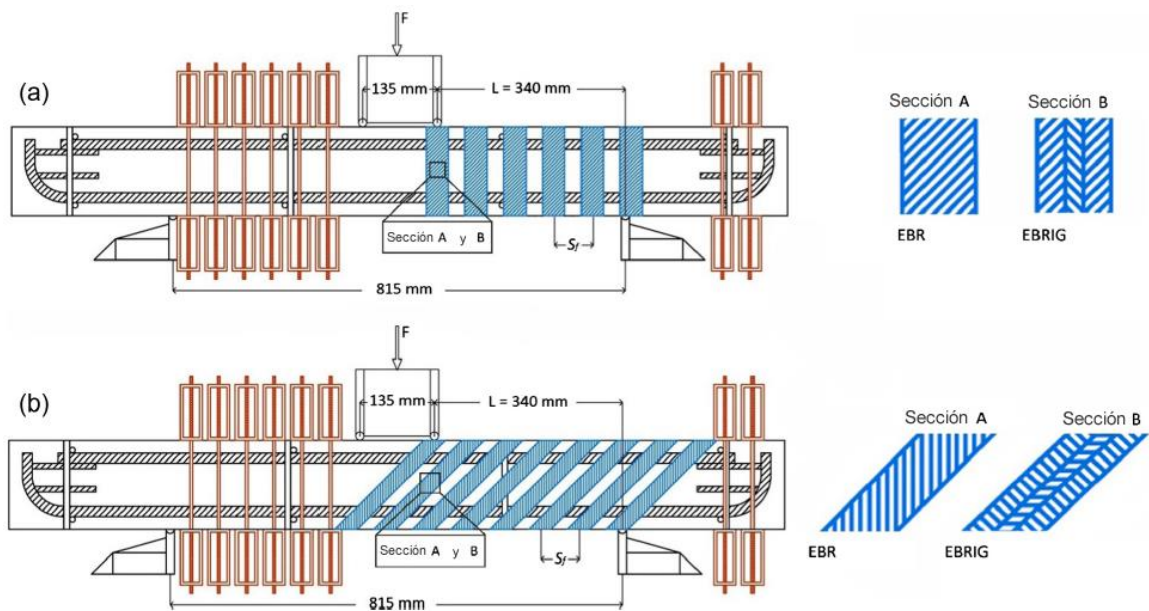


Figura 40. Configuración de diferentes métodos de fortalecimiento; (a-sección A) EBR-V; (a-sección B) EBRIG-V; (b-sección A) EBR-D; (b-sección B) EBRIG-D.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

Tabla 12.

*Especificaciones de los especímenes.*

Grupo	f'c [MPa]	Viga	Wf [mm]	Sf [mm]	Dimensiones ranuras (ancho x profundidad)	Método utilizado	Ángulo del CFRP [Grados]
<b>A</b>	42	A-EBR-V	60	90	-	2 lados	90
	42	A-EBRIG-V	60	70	10 x 10	2 lados	90
	42	A-EBR-D	60	90	-	2 lados	45
	42	A-EBRIG-D	60	70	10 x 10	2 lados	45
<b>B</b>	40.5	B-EBR-V	20	50	-	Revestimiento en U	90
	40.5	B-EBRIG-V	30	50	5 x 5	Revestimiento en U	90
	40.5	B-EBR-D	20	50	-	Revestimiento en U	45
	40.5	B-EBRIG-D	30	50	5 x 5	Revestimiento en U	45
<b>C</b>	42.5	C-EBR-V	20	70	-	Vuelta completa	90
	42.5	C-EBRIG-V	30	70	5 x 5	Vuelta completa	90
	42.5	C-EBR-D	20	70	-	Vuelta completa	45
	42.5	C-EBRIG-D	30	70	5 x 5	Vuelta completa	45
<b>D</b>	42	Control - 1	-	-	-	-	-
	42.5	Control - 2	-	-	-	-	-

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, &amp; Razavi, 2016

**6.2.1.3 Comparación de resultados experimentales y discusión.** La tabla 13 presenta los resultados de la prueba, incluyendo la resistencia a la compresión del cilindro de concreto en el momento de la prueba, la capacidad máxima de carga, el desplazamiento de la carga máxima en el centro de la viga y el mecanismo de falla de las vigas de cada grupo. Basado en los resultados de la prueba, se investigaron los efectos de la aplicación de diferentes métodos de refuerzo sobre la

capacidad de carga final, el desplazamiento a mitad de la viga, la curva carga-desplazamiento y la absorción de energía de los especímenes en cada grupo. A continuación se realiza una breve descripción de los resultados.

*6.2.1.3.1 Carga última.* La figura 41 compara las mejoras porcentuales de la capacidad de carga final para los especímenes reforzados por diferentes métodos con respecto a la viga de control en cada grupo. De acuerdo con la figura 41 y la tabla 13, la viga de control falló cuando la carga alcanzó 78,82 kN mientras que los especímenes reforzados por los métodos EBR-V, EBRIG-V, EBR-D y EBRIG-D en el grupo A registraron cargas finales de 127,6, 147,67, 169,28 , Y 172,78 kN, respectivamente; que indican mejoras del 62%, 87%, 115% y 119%, respectivamente, con respecto al control.

En el grupo B, las capacidades de carga última de los especímenes reforzados por los métodos EBR-V, EBRIG-V, EBR-D y EBRIG-D alcanzaron 164,27, 176,67, 153,62 y 178,81 kN, respectivamente, en el momento de la falla; que mostraron mejoras del 108%, 124%, 95% y 127%, respectivamente, con respecto al control.

Los especímenes del grupo C reforzados por los métodos EBR-V, EBRIG-V, EBR-D y EBRIG-D, resistieron cargas de 192.44, 201.21, 187.85 y 190.56 kN, respectivamente, muestran mejoras respectivamente de 144%, 155% 138%, y 142%, con respecto al control. La figura 41 muestra los efectos de la aplicación de diferentes técnicas de refuerzo sobre la capacidad de carga final de las vigas. De hecho, debido al mejor rendimiento de los métodos EBRIG-V y EBRIG-D en la transferencia de tensiones entre los materiales de FRP y el sustrato de concreto, las vigas reforzadas a través de estos métodos fueron capaces de resistir cargas mucho más altas que las reforzadas por los métodos EBR-V y EBR- D.

Tabla 13.

*Resumen de resultados.*

Grupo	Viga	Carga última [kN]	Deformación [mm]	Absorción de energía [J]	Mecanismo de falla
<b>A</b>	A-EBR-V	127.6	7.5	503	Falla cortante
	A-EBRIG-V	147.67	9.7	836	Falla cortante
	A-EBR-D	169.28	7.7	903	Falla cortante con desprendimiento de CFRP
	A-EBRIG-D	172.78	6	823	Falla cortante con desprendimiento de CFRP
	Control - 1	79.04	4.7	243	Falla cortante
<b>B</b>	B-EBR-V	164.27	5.1	592	Falla cortante con desprendimiento de CFRP
	B-EBRIG-V	176.67	7.3	1122	Falla cortante con desprendimiento de CFRP
	B-EBR-D	153.62	4.8	774	Falla cortante con desprendimiento de CFRP
	B-EBRIG-D	178.81	5.9	990	Falla cortante con desprendimiento de CFRP
	Control - 2	78.82	3.8	243	Falla cortante
<b>C</b>	C-EBR-V	192.44	7.2	1103	Falla corte-flexión con rotura del CFRP
	C-EBRIG-V	201.21	7.9	1047	Falla a flexión
	C-EBR-D	187.85	7.5	1280	Falla cortante con rotura del CFRP
	C-EBRIG-D	190.56	7.2	1013	Falla a flexión
	Control - 2	78.82	3.8	243	Falla cortante

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, &amp; Razavi, 2016

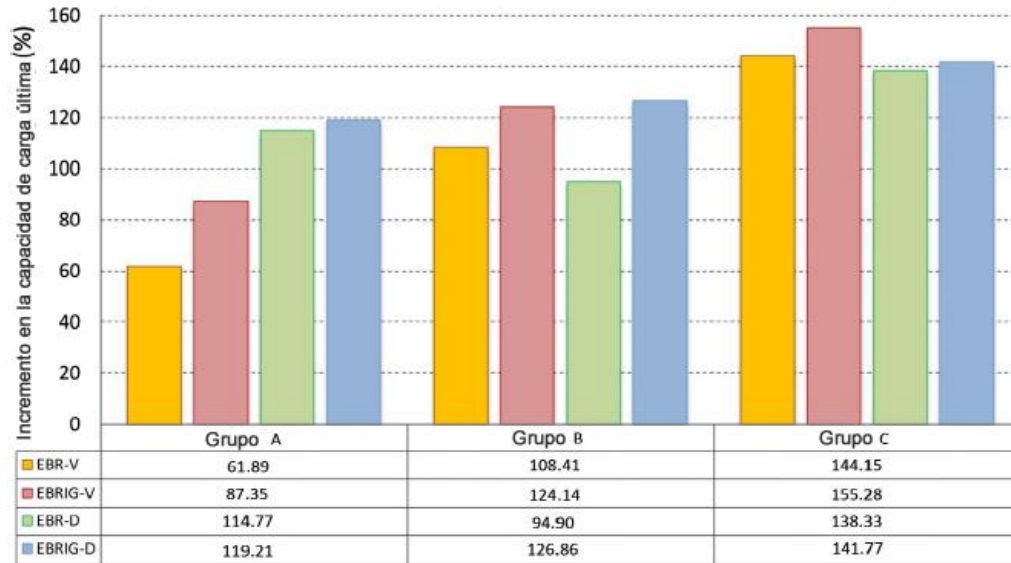


Figura 41. Efectos de diferentes métodos de refuerzo y fijación de CFRP en diferentes grupos sobre la capacidad de carga de las vigas ensayadas.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

En la tabla 13 se presentan los desplazamientos en la parte media de la viga, cuando se alcanzó la máxima capacidad de carga en cada muestra. Es evidente que al emplear la técnica de envoltura completa en los métodos EBR-V, EBRIG-V, EBR-D y EBRIG-D en el grupo C aumentaron las capacidades de carga finales de las vigas en aproximadamente 17%, 14%, 22% y 6,6%, respectivamente, con respecto al grupo B para el que se usó la técnica de revestimiento en U. Las mejoras en el grupo C fueron de 51%, 36%, 11% y 10,3% con respecto al grupo A para el cual se empleó la técnica de envoltura de dos lados. La aplicación de láminas diagonales de CFRP tuvo un efecto significativo en el grupo A para el cual se utilizó la técnica de envoltura de 2 lados y se lograron mejoras de aproximadamente 33% y 17% en la capacidad de carga final de los especímenes reforzados por el EBR-D y EBRIG- D, respectivamente, en comparación con los tratados con los métodos EBR-V y EBRIG-V. El revestimiento en U en el grupo B y la técnica de

envoltura completa utilizada en el grupo C condujeron a mayores valores de capacidad de carga final en los diferentes métodos investigados.

*6.2.1.3.2 Curvas carga-desplazamiento y ductilidad.* La ductilidad de un sistema estructural, sus componentes y los materiales constituyentes han tenido siempre especial importancia en el diseño estructural. La ductilidad de un miembro se define como su capacidad para sostener deformaciones inelásticas antes del fallo sin pérdida sustancial de resistencia. La ductilidad es una propiedad estructural deseable porque permite la redistribución de las tensiones internas y proporciona una advertencia de un fallo inminente. El área bajo las curvas de carga-desplazamiento hasta el punto de fallo de los especímenes puede ser utilizado como una indicación inicial y un criterio para comparar la tasa de absorción de energía y ductilidad de los especímenes (vigas). El área bajo la curva para los especímenes de cada grupo experimental en este estudio se calculó y se presentó en la tabla 13. La figura 42 muestra una comparación de las áreas obtenidas. Las curvas de carga vs desplazamiento para las vigas de los grupos A, B y C incluyen los especímenes reforzados mediante los métodos EBR-V, EBRIG-V, EBR-D y EBRIG-D, que se presentan de la figura 43 a la figura 45, respectivamente.

La figura 42 compara la absorción de energía y los aumentos porcentuales de ductilidad entre los especímenes reforzados por diferentes métodos y la viga de control de cada grupo. De acuerdo con la figura 42 y la tabla 13, la viga de control registró una absorción de energía de 251,8 J (kN mm), mientras que los reforzados por los métodos EBR-V, EBRIG-V, EBR-D y EBRIG-D en el grupo A registraron valores de 531.09, 879.78, 1241.39, and 1059.2 J para el mismo parámetro, mostrando una mejora del 110.9%, 249.4%, 393%, and 320.7%, respectivamente, con respecto al control. Los especímenes reforzados por los métodos EBR-V, EBRIG-V, EBR-D y EBRIG-D en el grupo B mostraron valores de absorción de energía de 817.44, 1156.8, 784.28, and 1257.091 J,

respectivamente, lo que es igual a un incremento del 224.6%, 359.4%, 211.5%, and 399.2%, respectivamente, con respecto al control. Finalmente, los valores de absorción de energía para los especímenes reforzados con los métodos EBR-V, EBRIG-V, EBR-D, and EBRIG-D del grupo C fueron 1122.5, 1110.1, 1351.6 y 916.1 J, respectivamente, mostrando una mejora de 345,8% ,340,9%, 436,8% y 263,8% en relación con el control.

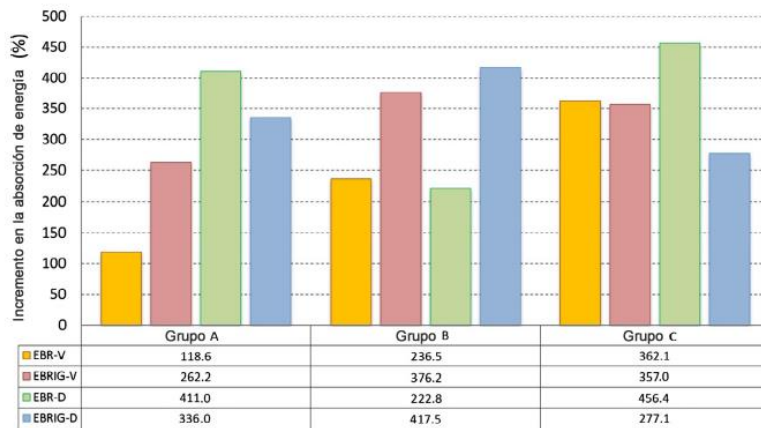


Figura 42. Efectos de diferentes métodos de refuerzo y fijación de CFRP en diferentes grupos sobre la absorción de energía de las vigas ensayadas.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

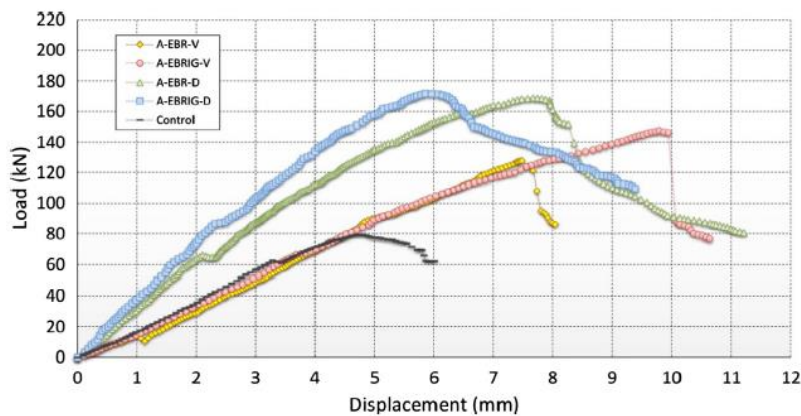


Figura 43. Curvas de Carga (kN) vs Deflexión (mm) de las vigas en el grupo A.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

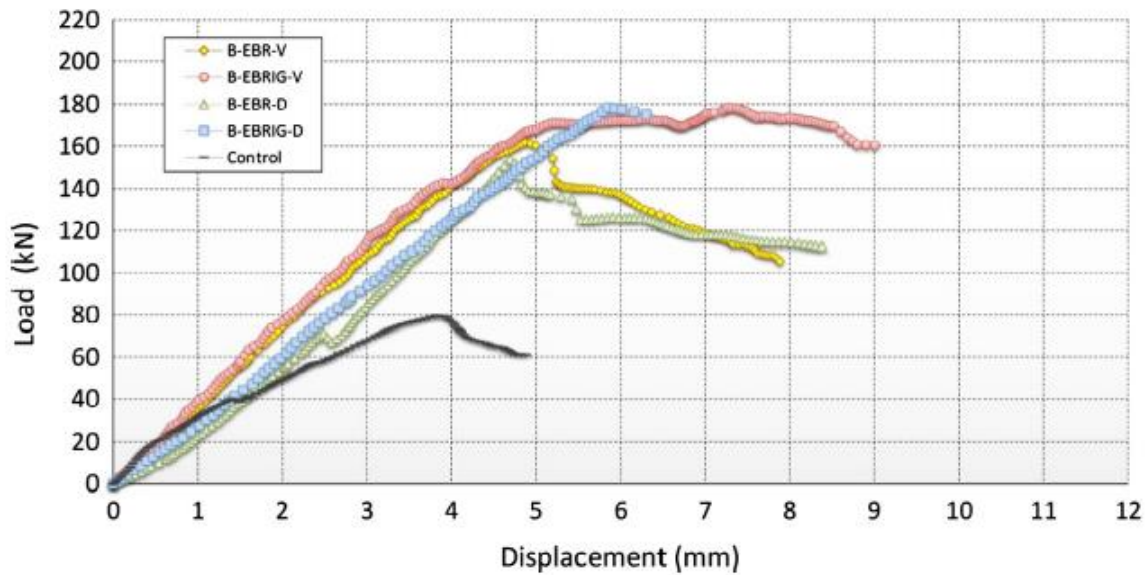


Figura 44. Curvas de Carga (kN) vs Deflexión (mm) de las vigas en el grupo B.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

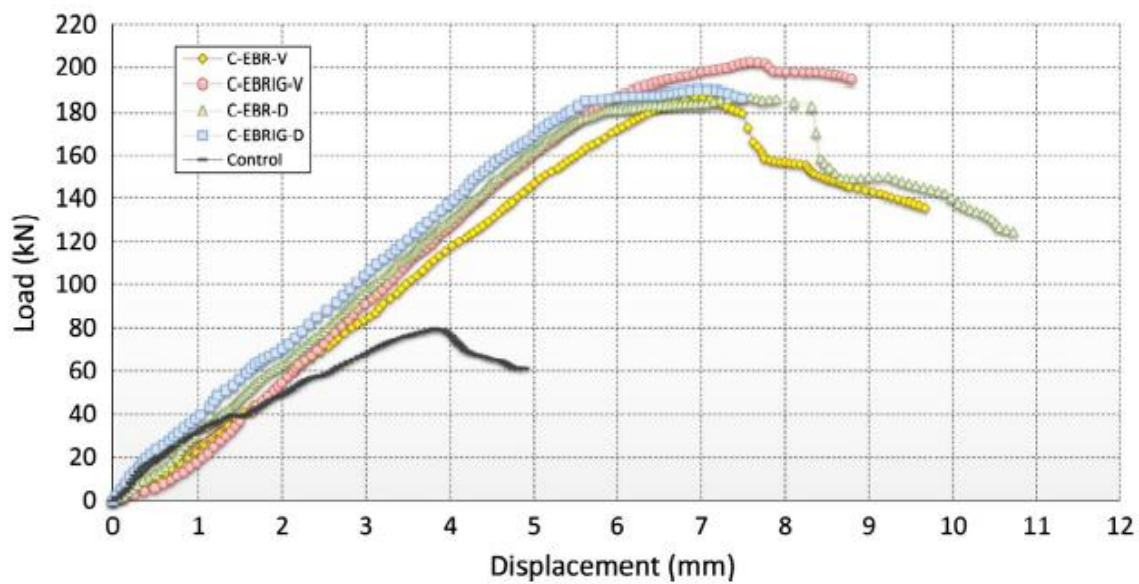


Figura 45. Curvas de Carga (kN) vs Deflexión (mm) de las vigas en el grupo C.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

6.2.1.3.3 *Mecanismo de falla.* La viga de control mostró un comportamiento frágil bajo la carga y las grietas de cortante expandidas en su área central que se extienden a los soportes, dando lugar a un mecanismo de falla de cortante como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En todos los especímenes del grupo A, las fisuras de cortante se extienden desde el punto de aplicación de carga hasta los soportes. Por otra parte, se observaron grietas longitudinales en las caras superior e inferior del sustrato de concreto debido a la unión inadecuada de las hojas de CFRP procedentes de la técnica de envoltura de dos lados. En este grupo, los especímenes reforzados a través de los métodos EBR-V y EBR-D experimentaron un fallo de cortante con desprendimiento de las láminas de CFRP del sustrato de concreto (desunión de interfaz), mientras que los reforzados mediante los métodos EBRIG-V y EBRIG-D sufrieron una falla por cortante con la separación tanto de las láminas CFRP como del sustrato de concreto (separación de la cubierta de concreto) como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Esta observación indica que, en comparación con el método EBR, el método EBRIG tiene un mayor potencial para transferir tensiones de corte a las capas de concreto más resistentes. Los especímenes en el grupo B sufrieron un fallo de cortante debido a que las grietas de cortante se expandieron en el área central y que luego se extendía a los soportes. Aunque se observó un desprendimiento prematuro de las láminas de CFRP del sustrato de concreto en todos los especímenes de este grupo, la técnica de revestimiento en U condujo a una unión mejorada de las hojas de CFRP, en comparación con la obtenida a partir de la técnica de envoltura de dos lados e impidió la propagación de grietas longitudinales en las caras superior e inferior del sustrato de concreto como se observa en la Figura 48.



*Figura 46.* Modo de falla de la viga control sin refuerzo de CFRP.

*Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016*

En el grupo C en el que se empleó la técnica de envoltura de vuelta completa para la instalación de láminas CFRP, se eliminaron por completo las grietas longitudinales y el desprendimiento prematuro, ya que se consiguió una unión adecuada entre las láminas CFRP y el sustrato de concreto. El espécimen reforzado mediante el método EBR-V experimentó un fallo flexo-cortante acompañado de la ruptura de CFRP debido a la propagación de grietas de cortante en la zona central que se extendía a los soportes. Por el contrario, la muestra reforzada mediante el método EBR-D experimentó un fallo de cortante acompañado de ruptura de CFRP y expansión de las fisuras de cortante desde la mitad de la viga hasta el extremo de la viga, tal como se observa en la Fig. 14. Por último, todos los ejemplares de este grupo que se fortalecieron mediante los métodos EBRIG-V y EBRIG-D fallaron cuando alcanzaron su máxima capacidad de flexión. El desprendimiento prematuro de las láminas CFRP y la expansión de las grietas longitudinales se eliminaron por completo en estos especímenes.

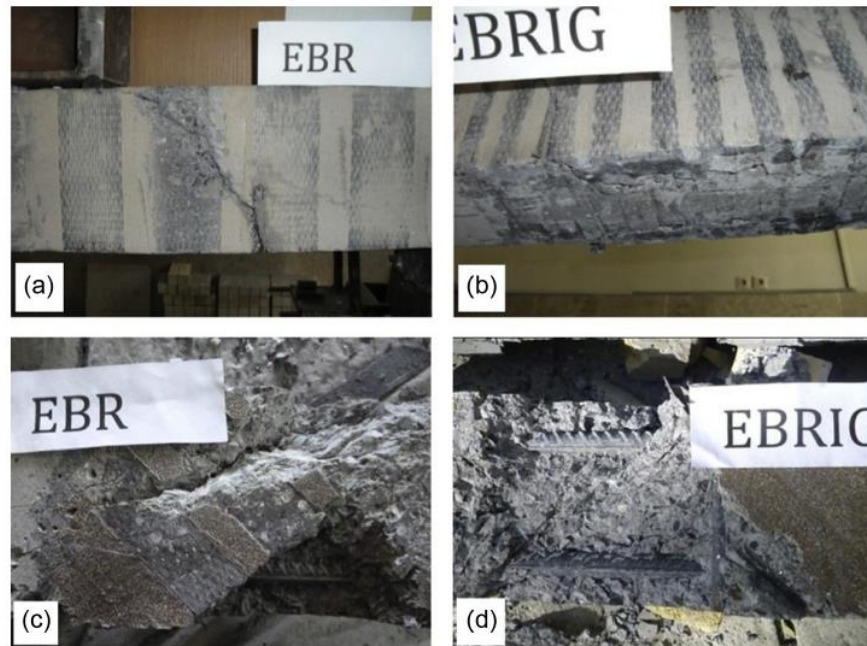


Figura 47. Modo de fallo de los especímenes del grupo A reforzados con diferentes métodos; (A) EBR-V; (B) EBRIG-V; (C) EBR-D; (D) EBRIG-D.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

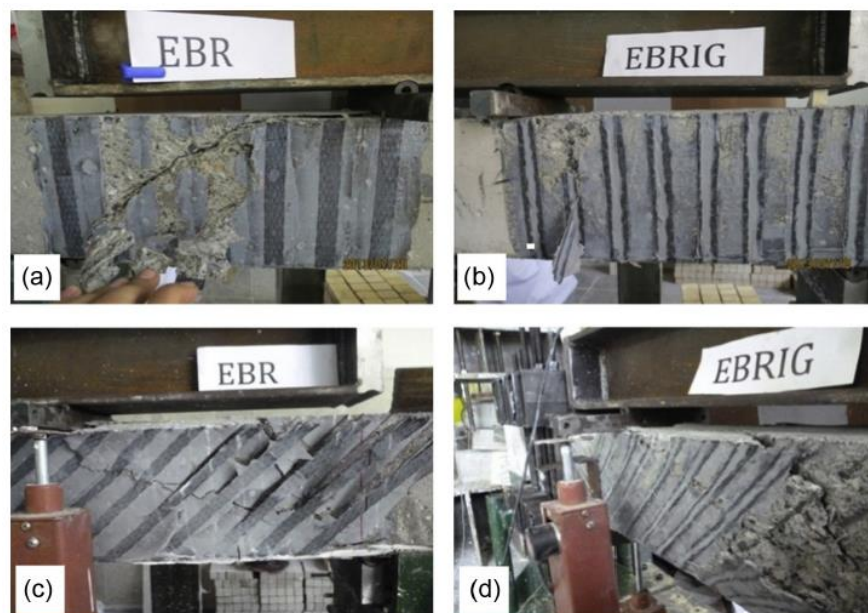


Figura 48. Modo de fallo de los especímenes del grupo B reforzados con diferentes métodos; (A) EBR-V; (B) EBRIG-V; (C) EBR-D; (D) EBRIG-D.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

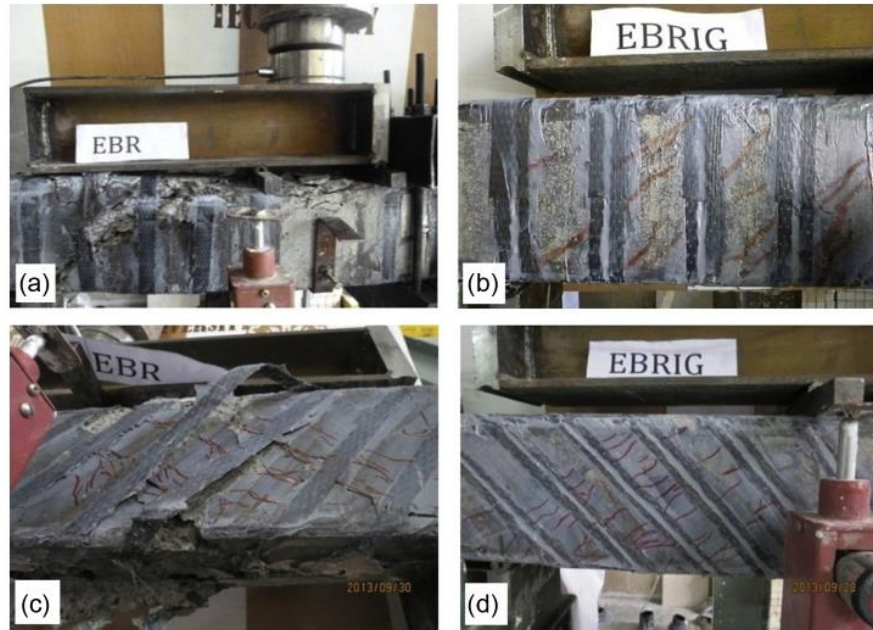


Figura 49. Modo de fallo de los especímenes del grupo C reforzados con diferentes métodos; (A) EBR-V; (B) EBRIG-V; (C) EBR-D; (D) EBRIG-D.

Nota: Adaptado de Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016

**6.2.1.4 Análisis de resultados.** En este experimento se evaluaron las técnicas de EBR y EBRIG para reforzar vigas a cortante de tres maneras diferentes: Dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa. Con los resultados, se logra observar que tanto la técnica EBR como la EBRIG aumentan la capacidad de carga de la viga, siendo la última la más efectiva. La combinación menos efectiva, en cuanto a la capacidad de resistencia de carga, fue la de EBR + Dos lados (mejora del 13%) debido a su menos efectiva adherencia entre las láminas de CFRP y el concreto, y la más efectiva fue la de EBRIG + vuelta completa (mejora del 89%), ya que gracias a las ranuras y a que las tiras de CFRP rodean la viga completamente, se crea una adherencia mejorada entre el refuerzo CFRP y el concreto.

Vale la pena destacar que con el uso de ranuras verticales y diagonales (EBRIG) combinadas con la técnica de vuelta completa, se logró eliminar la falla por desprendimiento del CFRP y con

las mismas ranuras, pero con el método de revestimiento en U lograron retrasar el desprendimiento permitiendo una mejora en la efectividad del refuerzo con CFRP. Estos resultados son de gran importancia ya que como se observó en las investigaciones de (Bilotta, Ceroni, Nigro, & Pecce, 2015), (Mostofinejad & Shameli, 2013) y (El-Ghandour, 2011), el desprendimiento del refuerzo CFRP fue la falla que más se repitió, y esta alternativa presenta una solución para esta falencia sin el uso de anclajes mecánicos.

**6.2.2 Experimento número 2: Artículo “Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips”** (Saleh H. Alsayed, 2013), *Construction and Building Materials* 42 (páginas 238-247) Para llevar a cabo el análisis de confiabilidad, se requieren capacidades nominales de carga de las vigas deficientes a cortante y las vigas reforzadas con CFRP. Para este propósito, seis especímenes fueron diseñados para ser débiles a cortante y fuertes a flexión (Esto con el fin de inducir la falla por cortante). La sección transversal y los detalles de refuerzo de los especímenes se muestran en la figura 50 y la tabla 14. De estos seis ejemplares de viga deficiente a cortante, se utilizaron los dos primeros especímenes como muestras de control y los cuatro especímenes restantes se reforzaron después de fijar las franjas de CFRP con epoxi en las caras laterales de las vigas. Las tiras de CFRP se unieron en un ángulo de  $90^\circ$  (figura 51) en los dos especímenes; al tiempo que se fijaron en un ángulo de  $30^\circ$  (figura 52) en las dos vigas restantes. Las tiras que estaban unidas a  $90^\circ$  y aquellas a  $30^\circ$  se denominarán tiras verticales e inclinadas respectivamente. La nomenclatura utilizada para las diversas vigas se muestra en la tabla 15. El diseño de los especímenes de control y reforzados con CFRP se basó en ACI 318 y ACI 440.2R-02, respectivamente. La resistencia a la flexión y al cortante de los especímenes se estimó y la relación de flexión respecto a la resistencia al corte de cada viga se determinó como se presenta en la tabla 16. La relación en la última columna evidencia que las muestras de control son

sustancialmente débiles a cortante y se espera que su falla sea por cortante. También para los especímenes reforzados con tiras verticales o inclinadas, se indica que la falla todavía se debe dar a cortante, ya que el objetivo del presente esquema de refuerzo es estudiar el incremento directo en la resistencia al corte y luego la fiabilidad debida a la inclinación vertical e inclinada de las tiras de CFRP. Cambiar el modo de falla de cortante a flexión por medio del reforzamiento con CFRP, no fue el objetivo de este estudio.

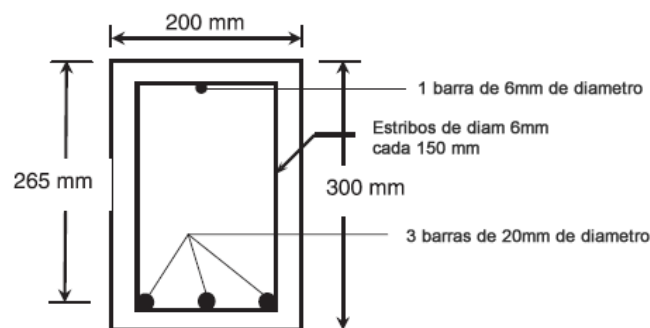


Figura 50. Sección transversal de los especímenes.

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

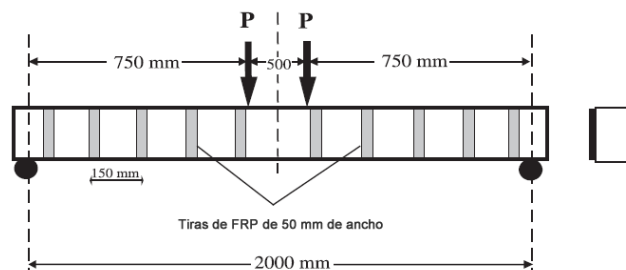


Figura 51. Diagrama esquemático del espécimen reforzado usando tiras verticales de CFRP

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

Tabla 14.

*Detalles de las vigas.*

Viga	Descripción	Tamaño de viga	Acero inferior	Acero superior	Estribos
BC (2 especímenes)	Control	200 x 300	3 de 20 mm	1 de 6 mm	6 mm cada 150 mm
BSV (2 especímenes)	Esquema #1	200 x 300	3 de 20 mm	1 de 6 mm	6 mm cada 150 mm
BSI (2 especímenes)	Esquema #2	200 x 300	3 de 20 mm	1 de 6 mm	6 mm cada 150 mm

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

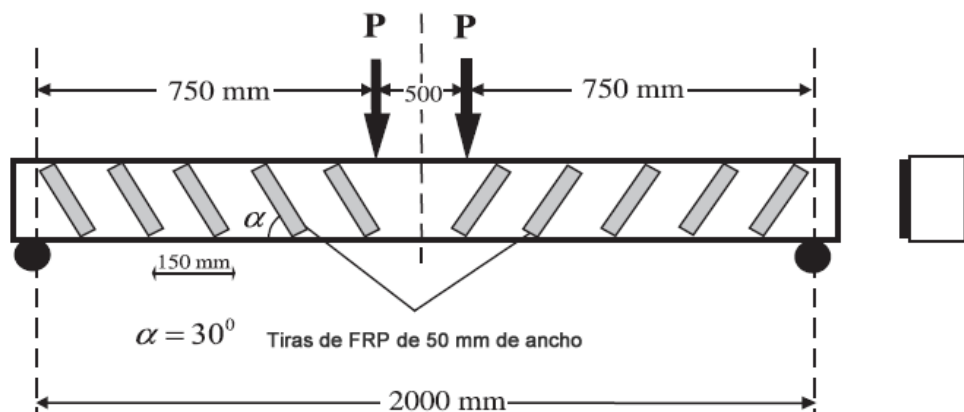


Figura 52. Diagrama esquemático del espécimen reforzado usando tiras inclinadas de CFRP

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

Tabla 15.

*Nomenclatura usada y detalles de los especímenes probados.*

Viga	# de especímenes	Detalles de los esquemas de fortalecimiento
BC	2	Vigas de control, débiles en corte pero fuertes en flexión.
BSV	2	Especímenes reforzados, obtenidos después del fortalecimiento de otros dos especímenes usando tiras verticales de CFRP. Se fijaron tiras verticales usando resina epoxi en las caras laterales de la viga.

Viga	# de especímenes	Detalles de los esquemas de fortalecimiento
BSI	2	Especímenes reforzados, obtenidos después del fortalecimiento de otros dos especímenes usando tiras diagonales de CFRP. Se fijaron tiras verticales usando resina epoxi en las caras laterales de la viga.

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

Tabla 16.

*Relación de diseño de cortante sobre fuerza a flexión.*

Viga	Descripción	Puflexión (kN)	Pucortante(kN)	Pucortante / Puflexión
BC	Control	123.2	67.8	0.6
BSV	Tiras verticales	123.2 a*	100.9	0.8
BSI	Tiras inclinadas	123.2 a*	113	0.9
a* =	Los valores mostrados son sin FRP. Para estar en el lado conservador, se supone que el refuerzo de cortante de las vigas usando tiras verticales o inclinadas de CFRP no aumenta la capacidad de flexión de las vigas.			

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

**6.2.2.1 Propiedades de los materiales.** Se utilizó un único lote para fundir todos los especímenes. Se fundieron seis cilindros (150x300 mm) para determinar la resistencia media a la compresión del lote,  $f'_c$ , a los 28 días. Las barras de acero utilizadas como refuerzos longitudinales y transversales se ensayaron para determinar su límite de fluencia. Las propiedades promedio observadas de la mezcla de concreto y barras de acero se muestran en la tabla 17.

El sistema epoxi utilizado en el estudio consiste en resina y endurecedor, mezclado en una proporción en peso de 3:1. Después de reforzar, los especímenes se dejaron en condiciones ambientales controladas en el laboratorio ( $25 \pm 2^\circ\text{C}$  y 30% de humedad relativa) durante 2 días antes de la prueba para asegurarse de que el epóxico tuviera suficiente tiempo para curar. Las

propiedades mecánicas del compuesto de CFRP obtenidas a partir de los valores medios de las muestras probadas, se resumen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Estos valores coinciden bien con los valores informados por el fabricante. Obsérvese que la resistencia a la tracción se definió con base en el área de la sección transversal de las muestras, mientras que el módulo elástico se calculó a partir de la respuesta tensión-deformación.

Tabla 17.

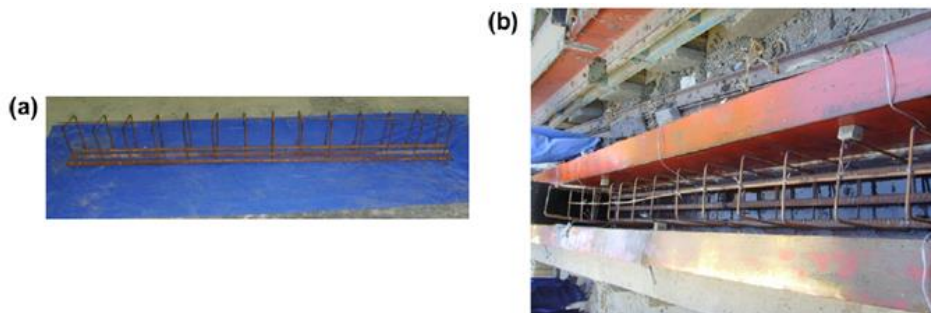
*Material y propiedades geométricas de los especímenes.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor nominal</b>
<b><i>Concreto y acero</i></b>	
Fuerza del concreto, $f'_c$	35 [MPa]
Fuerza de fluencia del acero longitudinal, $f_y$	480 [MPa]
Fuerza de fluencia del acero transversal, $f_y$	275 [MPa]
Módulo de elasticidad del acero, $E_s$	200 [GPa]
<b><i>Sistema compuesto CFRP</i></b>	
Tipo de FRP	Hoja de CFRP unidireccional
Módulo elástico en dirección de las fibras primarias	$77.3 \times 10^3$ [MPa]
Módulo elástico del CFRP a $90^\circ$ de las fibras primarias	40.6 [MPa]
Deformación de fractura	1.10%
Grosor por capa, $t_f$	1.0 mm
Ancho de cada tira de CFRP, $w_f$	50 mm
Profundidad efectiva de la tira de FRP, $d_f$	300 mm
Numero de capas de FRP, $n_p$	1
Espacio entre tiras de FRP, $s_f$	150 mm
Inclinación del FRP respecto a la horizontal	$30^\circ$
<b><i>Dimensiones de la viga</i></b>	
Luz de la viga, $l$	2000 mm
Ancho de la viga, $b$	200 mm
Profundidad del acero, $d$	265 mm
Altura total de la viga, $h$	300 mm
Diámetro de las barras de acero inferiores	20 mm
Diámetro de los estribos	6 mm
Distancia entre estribos	150 mm

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

### 6.2.2.2 Preparación de los especímenes de prueba

6.2.2.2.1 *Tamaño de espécimen y detalles del acero de refuerzo.* Todas las vigas tenían una sección transversal de 200 x 300 mm y una luz simplemente soportada de 2000 mm. De un total de seis vigas, se utilizaron dos vigas como especímenes de control y las otras cuatro se emplearon para preparar vigas de concreto reforzadas con CFRP. Las vigas se reforzaron con barras de acero de 3Ø20 mm deformadas en el lado de la tensión y con estribos de acero Ø6 mm @ 150 mm de centro a centro. También se utilizó una barra de Ø6 mm en el lado de compresión para atar los estribos (figura 53). Después de la fundida, los especímenes se sometieron a rociamiento intermitente de agua todos los días durante 2 semanas y luego se dejaron secar durante las 2 semanas siguientes. A los 26 días después de la fundición, se reforzaron cuatro vigas uniendo externamente las tiras de CFRP usando epoxi a la superficie del concreto.



*Figura 53.* Armadura de refuerzo y formaleta utilizada en la preparación de las vigas de concreto reforzado deficientes a cortante.

*Nota:* Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

6.2.2.2.2 *Fase de tratamiento de superficie.* La superficie de la viga, donde se iba a fijar la tira, primero se molió manualmente y luego se sometió a un chorro de arena para poder desarrollar un

buen enlace y soportar las tensiones impuestas. El proceso incluyó suavizar la irregularidad en la superficie. Después del alisado, la superficie del concreto se limpió con acetona varias veces hasta que no se encontró negrura en la toallita. En este punto las tiras también se limpiaron con acetona para eliminar el polvo o cualquier sustancia adherida.

6.2.2.2.3 Incorporación de las tiras de CFRP. Después de preparar las superficies de concreto y limpiar las tiras, las tiras fueron fijadas a las superficies de concreto usando epoxi. Cualquier exceso de epoxi se expulsó presionando las tiras hacia el concreto. Las tiras se mantuvieron entonces prensadas al concreto hasta endurecimiento. Los especímenes se mantuvieron en el laboratorio bajo condiciones de control hasta el día de la prueba. Las tiras fueron unidas a las vigas según los esquemas diseñados. En el primer esquema, las tiras de CFRP se fijaron en  $90^\circ$  con respecto al eje longitudinal de la viga, mientras que, en el segundo esquema, las tiras fueron fijadas en un ángulo de  $30^\circ$  desde el mismo eje de la viga. La figura 54 muestra los especímenes después de la unión de tiras verticales e inclinadas sobre las caras laterales de las vigas.



*Figura 54. Vigas reforzadas con tiras de CFRP vertical e inclinado*

*Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013*

**6.2.2.3 Configuración y procedimiento de la prueba.** Las vigas se ensayaron utilizando una máquina de ensayo Amsler con una configuración de control de carga. Todas las vigas se probaron simplemente soportadas y sometidas a dos cargas puntuales, colocadas simétricamente a una distancia igual de la línea central de la viga como se muestra en las figura 51 y figura 52. Las deflexiones centrales se controlaron usando un transductor de desplazamiento variable lineal (LVDT, por sus siglas en inglés). Las cargas aplicadas y las deflexiones LVDT correspondientes se registraron utilizando un sistema de adquisición de datos. La aplicación de las cargas y el proceso de grabación continuaron hasta que ocurrió la falla de la viga.

**6.2.2.4 Respuesta carga-deflexión y modo de falla** La respuesta de carga-deflexión de todas las seis vigas se representa gráficamente en la figura 55 y figura 56. Estas figuras ilustran la influencia de la orientación de la fibra de las tiras CFRP en la mejora de la resistencia al corte de las vigas de concreto reforzado. Los resultados mostrados en la figura 55 indican que aunque el uso de tiras verticales aumenta sustancialmente la capacidad de cortante, las tiras verticales no añaden ductilidad o deformabilidad considerables a las vigas. Al igual que en las muestras de control deficientes a cortante, se observó un fallo frágil a cortante en las muestras reforzadas usando tiras fijadas verticalmente.

Los resultados representados en la figura 56 muestra la eficacia de las tiras de CFRP inclinadas 30° en la mejora de la resistencia a cortante de las vigas de concreto. Esta figura indica claramente que, en comparación con la respuesta de las vigas de control; las vigas reforzadas con tiras inclinadas de CFRP lograron una ganancia sustancial en la resistencia y muestran una mejor deformabilidad. Esto ilustra la eficacia del uso de las tiras inclinadas en el refuerzo a cortante de las vigas de concreto reforzado. Un mejor rendimiento de las tiras inclinadas sobre las tiras

verticales puede atribuirse al hecho de que las tiras inclinadas detienen mejor las fisuras propagadas (debido a la tensión diagonal) que las tiras verticales.

En la tabla 18 se muestra un resumen de las cargas finales observadas experimentalmente. Esta tabla muestra que, comparadas con las muestras de viga de control, las vigas reforzadas con las tiras verticales e inclinadas, muestran un aumento sustancial en los valores de la resistencia a cortante (medida en términos de carga final). Una comparación adicional de los dos esquemas de refuerzo por cortante también ilustra que, para las vigas reforzadas con las tiras de CFRP inclinadas a  $30^\circ$ , el aumento de la capacidad de carga observada fue casi el doble (36%) que el de la viga reforzada con las tiras verticales (18%). Esto muestra un rendimiento mucho mejor de las tiras inclinadas en comparación con las tiras verticales de CFRP en el refuerzo a cortante de vigas de concreto reforzado.

Las Figuras de la figura 57 a la figura 59 muestran los patrones generales de falla observados en las vigas. Se observó que el fallo de la muestra de control era puramente debido al cortante ya que las grietas iniciaron cerca del soporte y se propagaron casi a  $45^\circ$  con el aumento de la carga aplicada hasta el fallo (figura 57). El fallo de las vigas reforzadas con las tiras verticales de CFRP fue también frágil debido a las grietas de cortante inclinadas como se muestra en la figura 58. Las curvas de carga-desplazamiento mostradas en la figura 55 indican lo mismo. Este patrón de fallo muestra que, aunque la resistencia al corte de las vigas ha sido sustancialmente mejorada (comparada con sus especímenes de control respectivos), las vigas siguen siendo más débiles a cortante que a flexión. El fallo de las vigas reforzadas con las tiras inclinadas no era tan frágil como las vigas reforzadas con tiras verticales (figura 59). Esto indica que el refuerzo de las vigas que utilizan tiras inclinadas no sólo imparte la resistencia a las vigas, sino que también les aportan algo de ductilidad. Las curvas de carga-desplazamiento mostradas en la figura 56 también ilustran lo mismo. Las fisuras observadas (y el desprendimiento) también fueron mucho menores en el caso

de las tiras inclinadas que en el de las tiras verticales. De hecho, cuando la carga aplicada estuvo cerca de la carga final, las barras de tensión de la viga entraron en fluencia y estas barras experimentaron entonces un endurecimiento por deformación, pero antes de llegar al límite de deformación unitaria dúctil de 0,005, las fuerzas de corte alcanzaron a la capacidad de corte de la viga y el fallo de cortante tuvo lugar como se muestra en la figura 56. Los patrones de fallo, mostrados en las figuras de la Fig. 8 a la Fig. 10, también indican que los especímenes fallaron según el diseño. En el diseño de todos los especímenes, la resistencia al corte se mantuvo menor que la resistencia a la flexión como se muestra en la tabla 16.

Tabla 18.

*Resumen de las cargas últimas experimentales observadas.*

<b>Viga</b>	<b>Carga máxima observada (kN)</b>	<b>Carga máxima promedio Pu (kN)</b>	<b>Incremento de la fuerza última respecto al control</b>
BC-1	81.98	81.2	-
BC-2	80.4		
BSV-1	95.97	96.4	18.70%
BSV-2	96.74		
BSI-1	111.01	110.8	36.40%
BSI-2	110.53		

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

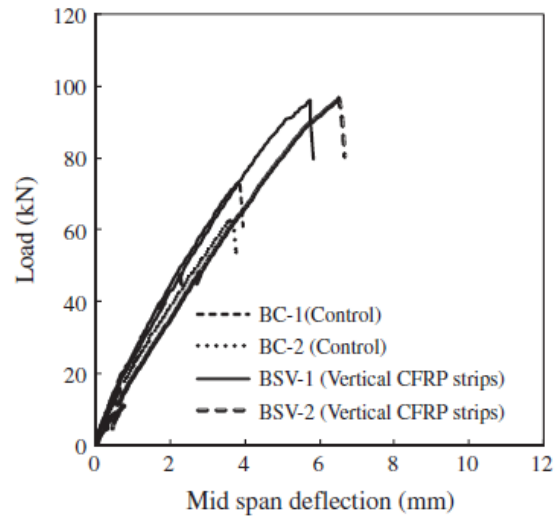


Figura 55. Curvas carga (kN) vs deflexión (mm) de las vigas de control y las vigas con tiras CFRP verticales.

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013

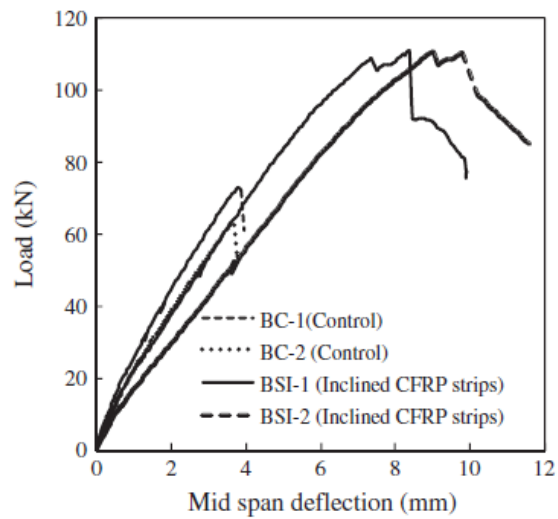
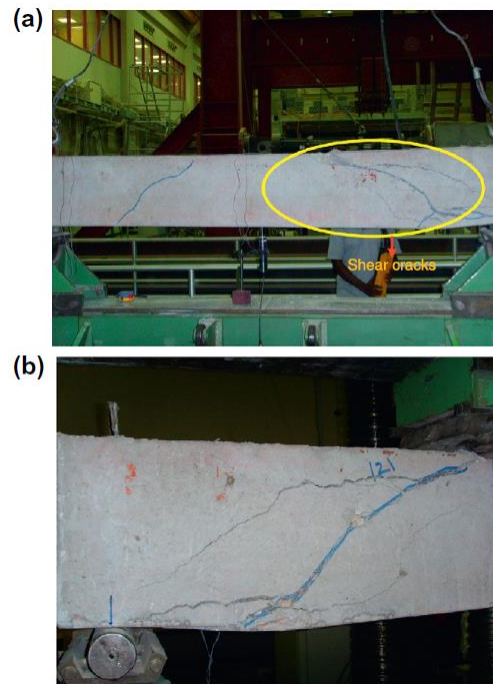


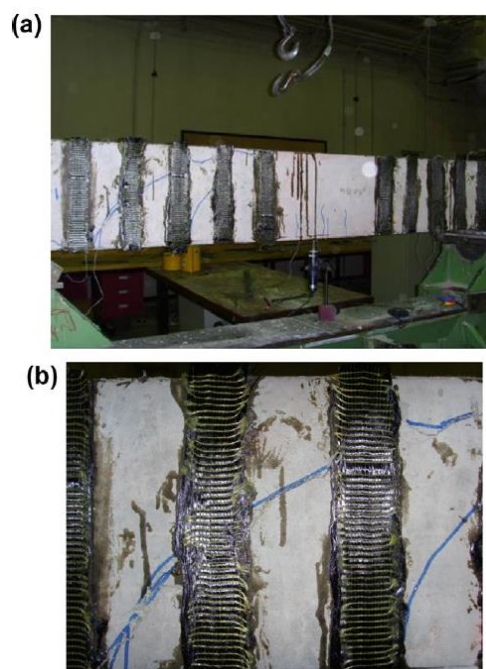
Figura 56. Curvas carga (kN) vs deflexión (mm) de las vigas de control y las vigas con tiras CFRP inclinadas.

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013



*Figura 57.* Falla a cortante de la viga de control.

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013



*Figura 58.* Falla de la viga reforzada con CFRP vertical.

Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013



*Figura 59. Falla de la viga reforzada con CFRP inclinado.*

*Nota: Adaptado de Saleh H. Alsayed, 2013*

**6.2.2.5 Análisis de resultados.** En este experimento se probaron seis vigas, diseñadas todas para ser más débiles a cortante que a flexión, con el fin de inducir el modo de falla debido a la primera sollicitación mencionada. La técnica utilizada fue la EBR con tiras a dos lados, a  $90^\circ$  y a  $30^\circ$ . Antes de instalar las láminas, la viga se sometió a un proceso de preparación de superficie para garantizar una correcta transmisión de los esfuerzos. Después de realizada la prueba, se observó que las tiras inclinadas a  $30^\circ$  (mejora del 36%) ofrecen un mejor desempeño que las verticales (mejora del 18%), respecto a las vigas de referencia, esto se puede atribuir a que al estar inclinadas ofrecen una mayor resultante de fuerza opuesta a la fisura por cortante. Sin embargo, tanto las vigas de control como las vigas reforzadas fallaron por cortante, aunque en el caso de las inclinadas se observó que la falla fue menos frágil. Aún queda pendiente profundizar en la incidencia del ángulo utilizado en la mejoría del desempeño de la viga, porque aunque en (Mostofinejad, Hosseini, & Razavi, 2016) se utilizaron tiras de CFRP a  $45^\circ$ , la configuración de las vigas era diferente y no sirve de comparación respecto a las vigas que tenían tiras de CFRP a  $30^\circ$  en este experimento. El refuerzo inclinado perpendicular (o en sentido contrario) a las fisuras por cortante siempre será más efectivo que el

refuerzo vertical. Sin embargo, con el vertical se pueden alcanzar resultados aceptables y es más fácil de instalar que el inclinado, por lo que se deben revisar muy bien ambas alternativas.

## 7. Conclusiones Finales

- En las técnicas de refuerzo de vinculación externo (EBR) y refuerzo de vinculación externo con hendidura (EBRIG), independientemente de si el refuerzo es para flexión o cortante, previo a la instalación de las tiras o láminas de CFRP se debe hacer una preparación de la superficie del concreto que consiste en remover las impurezas y la primera capa débil del concreto para lograr la rugosidad adecuada para que se adhieran de forma correcta las láminas de polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP, por sus siglas en inglés) al concreto y así poder transmitir eficientemente los esfuerzos. De este proceso depende el correcto funcionamiento del refuerzo.
- Como refuerzo a flexión en vigas de concreto reforzado, se estudiaron las técnicas EBR y EBRIG. En todos los experimentos se fabricaron vigas de control que servían para cuantificar la incidencia del refuerzo con CFRP en las vigas. De acuerdo a los resultados obtenidos, se logró determinar que en todos los casos el CFRP mejoró la capacidad de carga última y la capacidad de disipación de energía de las vigas ensayadas.
- En las vigas examinadas con refuerzo CFRP a flexión con las técnicas EBR y EBRIG se observó que la técnica EBRIG siempre ofreció mejores resultados, lo que indica que las ranuras mejoran de forma significativa el vínculo entre el refuerzo CFRP y el concreto de la viga.

- Independientemente de la técnica utilizada (EBR o EBRIG), la falla por desprendimiento se presentó en la mayoría los casos, siendo el principal problema a resolver para el refuerzo a flexión. Este problema se podría solucionar por medio de anclajes mecánicos, que ayuden a mantener las tiras adheridas al concreto.

- En una de las pruebas realizadas por los investigadores (Mostofinejad & Shameli, 2013), se examinaron con la técnica EBR y EBRIG vigas reforzadas con una, dos y tres capas de refuerzo CFRP, obteniendo mejores resultados con la técnica de EBRIG con tres capas. Esto quiere decir que el número de capas de refuerzo CFRP a flexión influye directamente en el aumento de las capacidades de la viga (carga última, rigidez y disipación de energía).

- Cuando se utilizaron las técnicas EBR y EBRIG combinadas con las técnicas de refuerzo a dos lados, revestimiento en U y de vuelta completa, en todos los casos mostraron un incremento en sus capacidades de carga última y disipación de energía. La combinación menos efectiva, según los resultados obtenidos, fue la de EBR con refuerzo CFRP a dos lados y la que mejores resultados ofreció fue la de EBRIG con refuerzo CFRP de vuelta completa.

- En el refuerzo a cortante con CFRP, la falla que se repitió de forma constante fue la de desprendimiento de las tiras de CFRP. Únicamente cuando se utilizó EBRIG combinado con CFRP de vuelta completa se logró eliminar la falla por desprendimiento.

- En cuanto a la inclinación de las tiras de CFRP cuando se utilizan para el refuerzo a cortante, se logró determinar que ya sea a  $30^\circ$  o a  $45^\circ$ , mejora de forma considerable su resistencia al cortante comparado con las tiras que se instalaron a  $90^\circ$ , esto se da porque la inclinación de las tiras se presenta perpendicular (o casi perpendicular) a la ruta de falla por cortante, absorbiendo así mayores esfuerzos.

- En comparación con el método de reforzamiento por encamisado de concreto reforzado, se determinó que aunque el refuerzo con láminas de CFRP es mucho más rápido y menos invasivo, la técnica de encamisado ofrece una efectividad superior al 200 % con respecto a las deformaciones alcanzadas y una efectividad mayor al 50% con respecto a la cantidad de energía disipada, según los resultados obtenidos en (Tahsiri, Sedehi, Khaloo, & Raisi, 2015). En cuanto al modo de falla, el refuerzo con láminas u hojas de CFRP siempre falló por desprendimiento, mientras que el encamisado gracias a sus conectores de cortante, permitió un vínculo casi monolítico con la viga existente garantizando total ductilidad y una falla por rotura del concreto a flexión, que es preferible que la de cortante, ya que es menos frágil.

- Observadas las diferentes investigaciones, es seguro decir que la utilización de refuerzo con CFRP es válida para repotenciar o reforzar vigas respecto a la resistencia de cargas verticales. Siendo este refuerzo una opción rápida y efectiva. Dentro de las técnicas investigadas, se recomienda para flexión utilizar la técnica EBRIG con múltiples capas de CFRP, dependiendo de la necesidad. En cuanto el refuerzo a cortante, la recomendación es utilizar la técnica EBRIG con instalación de vuelta completa (cuando sea posible) o de revestimiento en U, con las tiras inclinadas para ofrecer oposición a la falla por cortante.

### Referencias Bibliográficas

- ACI, A. C. (2006). ACI 440.1R-06 - Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. En A. C. (ACI). ACI.
- Aldahdooh, M., Bunnori, N. M., Johari, M. M., Jamrah, A., & Alnuaimi, A. (2016). Retrofitting of damaged reinforced concrete beams with a new green cementitious composites material. *Composite Structures* 142, 27-34.
- Altun, F. (2004). An experimental study of the jacketed reinforced-concrete. *Construction and Building Materials* 18, 611-618.
- Bakis, C. E., L. C. Bank, F., V. L. Brown, M., Cosenza, E., J. F. Davalos, A., Lesko, J. J., . . . and T. C. Triantafillou, M. (2002). Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. *American Society of Civil Engineers - 150th anniversary Paper*, 7-8.
- Bashir H. Osman, E. W. (2016). Effect of reinforcement ratios on shear behavior of concrete beams strengthened with CFRP sheets. *HBRC*, Indef.
- Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E., & Pecce, M. (2015). Efficiency of CFRP NSM strips and EBR plates for flexural strengthening of RC beams and loading pattern influence. *Composite Structures* 124, 163-175.
- Cem C. Tutum, K. D. (2015). Constrained Efficient Global Optimization for Pultrusion Process. *Materials and Manufacturing Processes*, 30, 538–551.
- Chen, G., Zhang, Z., Li, Y., Li, X., & Zhou, C. (2016). T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips. *Composite Structures* 144, 57-79.
- Correia, J. R. (31 de Mayo de 2013). THE NEW FRP MATERIALS FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURAL APPLICATIONS. *57th Meeting of the European Council of Civil Engineers (ECCE)*. Lisboa, Portugal.

- El-Ghandour, A. (2011). Experimental and analytical investigation of CFRP flexural and shear strengthening efficiencies of RC beams. *Construction and Building Materials* 25, 1419-1429.
- G.M. Chen, J. T. (2012). Process of debonding in RC beams shear-strengthened with FRP U-strips or side strips. *International Journal of Solids and Structures* 49, 1266-1282.
- G.M. Chen, Z. Z. (2016). T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips. *Composite Structures* 144, 57-79.
- Ibars, E. O. (2005). *Peeling failure in beams strengthened by plate bonding. A design proposal*. Barcelona : Universitat Politecnica de Catalunya.
- Ismail M.I. Qeshta, P. S. (2016). Research progress on the flexural behaviour of externally bonded RC beams. *archives of civil and mechanical engineering* 1 6, 982-1003.
- Mohammadali Rezazadeh, S. C. (2016). Exploring new NSM reinforcements for the flexural strengthening of RC beams: Experimental and numerical research. *Composite Structures* 141, 132-145.
- Morgan, P. (2005). Carbon Fibers and Their Composites. En P. Morgan, *Carbon Fibers and Their Composites* (págs. 66-68). Taylor and Francis Group.
- Mostofinejad, D., & Shameli, S. M. (2013). Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams. *Construction and Building Materials* 38, 751-758.
- Mostofinejad, D., Hosseini, S. A., & Razavi, S. B. (2016). Influence of different bonding and wrapping techniques on performance of beams strengthened in shear using CFRP reinforcement. *Construction and Building Materials* 116, 310-320.
- Osman, B. H., Wu, E., Ji, B., & Abdulhameed, S. S. (2016). Effect of reinforcement ratios on shear behavior of concrete beams strengthened with CFRP sheets. *Housing and Building National Research Center*.
- Saleh H. Alsayed, N. A. (2013). Reliability of shear-deficient RC beams strengthened with CFRP-strips. *Construction and Building Materials* 42, 238-247.

SIKA. (2015). *Sika CarboDur Ficha Tecnica*. SIKA.

Tahsiri, H., Sedehi, O., Khaloo, A., & Raisi, E. M. (2015). Experimental study of RC jacketed and CFRP strengthened RC beams. *Construction and Building Materials* 95, 476-485.