



Aplicación de fibra de carbono CFRP en el reforzamiento a flexión de vigas de experimentales de concreto armado en la ciudad de Huaraz

Application of CFRP Carbon Fiber in the bending reinforcement of reinforced concrete experimental beams in Huaraz city

FERNANDO DEPAZ HIDALGO¹, JORGE BEDON LÓPEZ², CARLOS OLAZA HENOSTROZA¹

RESUMEN

El presente artículo trata sobre el reforzamiento a flexión de vigas de concreto armado a través de polímero reforzado con fibras de carbono (CFRP). El objetivo principal es comparar los resultados obtenidos con un diseño de reforzamiento teórico con los obtenidos en vigas con el refuerzo CFRP ensayadas, así como establecer la influencia sobre la capacidad de las vigas a flexión, en función de una viga obtenida del análisis estructural realizado para una edificación modelo sometida a distintas sobrecargas para generar el aumento del momento flector haciendo necesaria la colocación del refuerzo CFRP. Finalmente, se compara los resultados de los ensayos con los del diseño teórico, que evidencia que el refuerzo CFRP influye positivamente en la capacidad a flexión de las vigas, aunque hay una diferencia de capacidad teórico-práctica; se concluye que se debe de considerar un factor de corrección.

Palabras clave: Reforzamiento estructural; Polímero reforzado con fibras de carbono; capacidad a flexión de vigas; demanda estructural.

¹Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú.

²Universidad Nacional del Santa. Chimbote, Perú.

©Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Aporte Santiaguino de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite: Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

ABSTRACT

This article deals with the flexural reinforcement of reinforced concrete beams through carbon fiber reinforced polymer (CFRP), with the main objective of comparing the results obtained with a theoretical reinforcement design and those obtained in beams with the reinforcement CFRP tested, in addition to establishing the influence it has on the capacity of the beams to bending, all this based on a beam obtained from the structural analysis carried out for a model building subjected to different overloads to generate the increase in the bending moment making the placement necessary. CFRP booster; Finally, the comparison between the results of the tests and those of the theoretical design is presented, showing that the CFRP reinforcement positively influences the bending capacity of the beams, although there is a difference in the theoretical-practical capacity, concluding that it should be considered a correction factor.

Keywords: Structural reinforcement; Carbon Fiber Reinforced Polymer; flexural capacity of beams; structural demand.

INTRODUCCIÓN

La masificación del uso de los materiales nobles, como el concreto, acero y albañilería, ha producido problemas de carácter social, como el aumento de la autoconstrucción, edificaciones construidas sin criterios técnicos ingenieriles, desde el proceso constructivo hasta el diseño arquitectónico y estructural; ello conlleva que las edificaciones sean precarias, inseguras y con peligro latente al colapso bajo solicitaciones sísmicas, además del cambio de uso de una edificación; esto genera que las sobrecargas varíen, siendo el caso más crítico, que aumenten, produciendo mayores demandas estructurales (Contreras, 2017).

Son estas las razones por las que, actualmente, se vienen desarrollando técnicas de reforzamiento de edificaciones, entre las que destaca el reforzamiento de elementos estructurales con fibra de carbono, ya que es un material muy resistente y con un proceso de construcción sencillo, aunque los costos todavía son elevados.

Chávez (2019) investiga la resistencia a flexión de vigas con distintos anchos reforzadas con fibra de carbono. De la misma forma, Contreras (2017) analiza el comportamiento de vigas de concreto reforzado con fibra de carbono, y obtiene resultados favorables en el incremento de la resistencia a flexión de las vigas.

La presente investigación busca estimar una cantidad de refuerzo para una determinada

solicitación adicional, con el fin de establecer factores que permitan aplicar el uso del reforzamiento de acuerdo con la realidad regional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las vigas fueron diseñadas a partir del análisis estructural de una edificación inicial propuesta para la investigación, y bajo cargas por gravedad.

La edificación propuesta tiene las siguientes características:

- Es de 4 niveles, destinados a viviendas, con una sobrecarga de 200 Kg/m^2 según la norma E020 del Reglamento Nacional de Edificaciones.
- El sistema estructural de la edificación es d Pórticos.

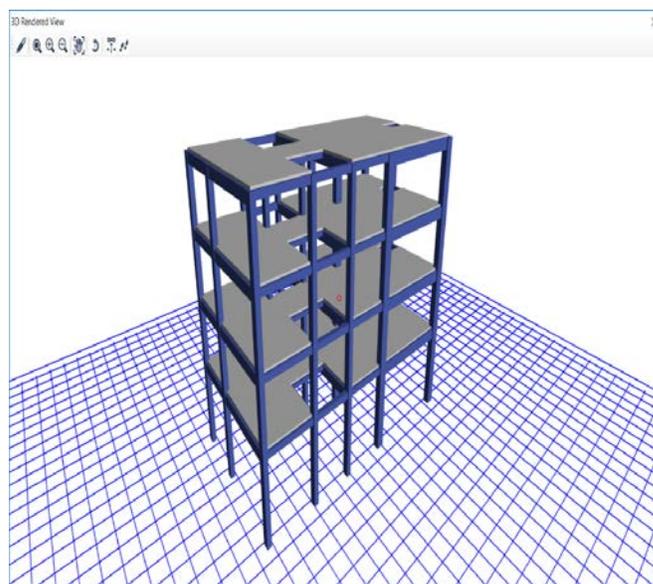


Figura 1. Modelo estructural

Se realizaron las asignaciones de carga viva y muerta a las losas

Carga muerta:

Piso terminado: 100 Kg/m^2

Ladrillos de techo: 80 Kg/m^2

Carga viva:

Viendas: 200 Kg/m^2

Del análisis de la edificación para las cargas por gravedad, se obtiene el diagrama de momento flector, para el diseño por flexión, bajo la combinación de carga $1,4\text{CM} + 1,7\text{CV}$.

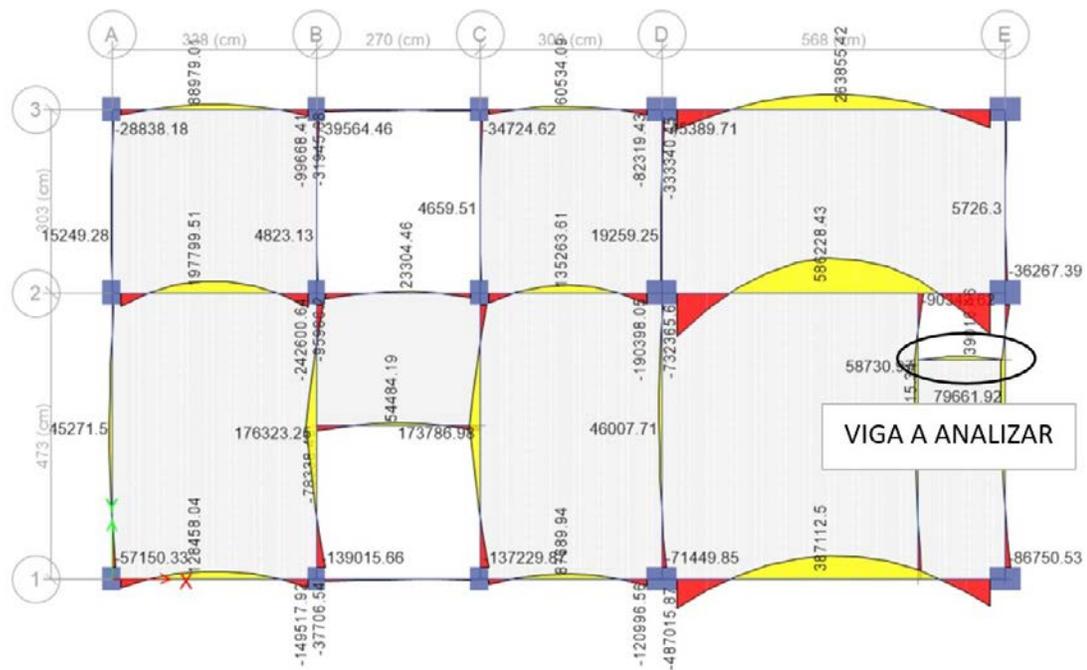


Figura 2. Viga que será objeto de estudio.

La viga VCH1-15x20 objeto de la investigación tiene una longitud $L = 1,45$ m, y una sección transversal de 15x20 cm, las losas aligeradas se apoyan sobre esta viga, por lo que se transmitirán tanto la carga muerta como viva; además, por ser una viga chata, el análisis de esta se realiza como si estuviera simplemente apoyada; esto se hace para evitar introducir momentos de torsión a sus vigas peraltadas de apoyo; a la viga de estudio se le diseñó el acero de refuerzo para dicho momento requerido positivo calculado.

Para el caso de las vigas con reforzamiento de fibra de carbono CFRP, se considera la edificación inicial, para que este soporte mayores cargas vivas, por lo que se tendrá momentos flectores más grandes. Los materiales utilizados fueron:

- Concreto** con resistencia especificada del concreto a compresión, obtenido a partir de ensayos de compresión de 6 probetas de diámetro de 10 cm a los 7 días, para luego extrapolar su valor a los 28 días, y determinar, así, el valor de f'_c a usar, el cual fue de $f'_c = 586,68$ Kg/cm² (57,54 MPa) y un módulo de elasticidad del concreto: $E_c = 35649,94$ MPa.
- Acero de refuerzo**
 - Resistencia a la fluencia del acero: $f_y = 4200$ Kg/cm² (411,88 MPa)
 - Módulo de elasticidad del acero: $E_s = 200000$ MPa
- Láminas de fibra de carbono CFRP:**
 - Espesor de la lámina: $t_f = 0,165$ mm

- Resistencia última a la tensión: $f_{fu}^* = 3800 \text{ MPa}$
- Deformación de rotura: $\epsilon_{fu}^* = 0,0167$
- Módulo de Elasticidad de las láminas FRP: $E_f = 227000 \text{ MPa}$

El acero de refuerzo de las vigas patrón fue diseñado usando las teorías clásicas del diseño de vigas por flexión, esto a partir del análisis estructural para la combinación 1,4CM + 1,7CV (figura 3).

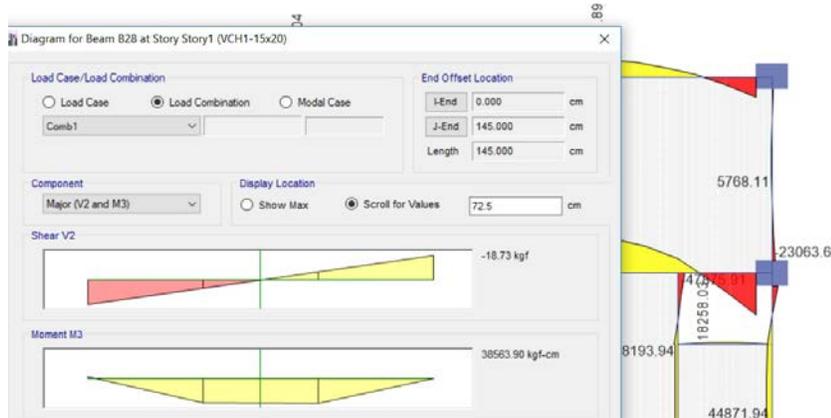


Figura 3. Resultados de momento flector, para la combinación 1,4CM + 1,7CV

Para un momento de diseño de 38563,90 Kg.cm se obtuvo un refuerzo de 2 Ø 1/4" ($A_s = 0,633 \text{ cm}^2$)

Este refuerzo fue colocado para las 3 vigas patrón, y para las otras 12 que tuvieron refuerzo exterior de fibra de carbono, se colocaron estribos de 1/4" de diámetro cada 15 cm para evitar la falla por corte; se colocaron alambres N8 de montaje en la parte superior de la viga, para evitar que los estribos se movieran; la elección del alambre se hizo para que este no incremente la capacidad a flexión de la viga (y evitar que funcione como viga doblemente reforzada). (figuras 4).



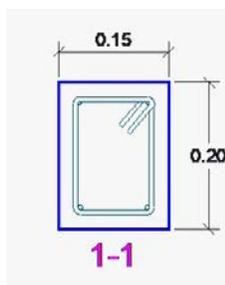


Figura 4. Esquema del refuerzo con acero corrugado interior colocado.

El diseño de las vigas de concreto armado con reforzamiento de fibra de carbono CFRP se realizó siguiendo los lineamientos del ACI 440.2R-08 (American Concrete Institute, 2008), con la finalidad de que soporten las cargas vivas incrementadas con relación al estado inicial, que produce un aumento en el valor del Momento Flector.

Para esto, se continuó con el modelo estructural inicial, al que se le aplicaron mayores sobrecargas por un cambio de uso, las sobrecargas (carga viva) se incrementaron a 500 Kg/m², 1000 Kg/m² y 1500 Kg/m².

Estas sobrecargas producen que el momento en la viga investigada se incremente, haciendo que la viga con la sobrecarga de 200 Kg/m² inicial falle; por esta razón, se le coloca el refuerzo externo de fibra de carbono CFRP para cubrir estas variaciones de momento. En la tabla 1, se resumen los momentos que producen la carga muerta y la carga viva de cada caso (en Kg-cm).

Tabla 1. Resumen de variación de momentos para cada caso (obtenido del análisis)

Momento flector	Inicial (S/C = 200 Kg/m ²)	S/C = 500 Kg/m ²	S/C = 1000 Kg/m ²	S/C = 1500 Kg/m ²
Debido a la carga muerta	18248,06	18248,06	18248,06	18248,06
Debido a la carga viva	7656,83	19150,31	38311,60	57467,40
Momento por Servicio (CM + CV)	25904,89	37398,37	56559,66	75715,46
Momento Amplificado (1,4CM + 1,7CV)	38563,90	58102,81	90677,00	123241,86

Con el apoyo de hojas de cálculo, se obtuvieron los refuerzos de fibra de carbono para cada caso de sobrecarga en exceso, en comparación con la condición inicial. El resumen del cálculo del reforzamiento con CFRP se muestra en la tabla 2:

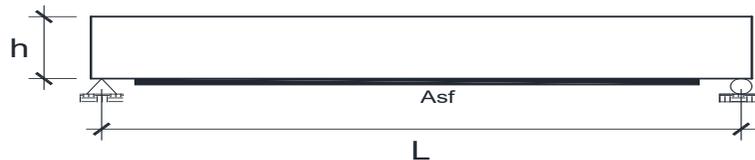


Figura 5. Esquema de colocado de Refuerzo CFRP en las vigas a ensayar.

Tabla 2. Resumen de refuerzo de fibra de carbono para cada caso

CASO	Momento Amplificado M_u (KN-m)	Área de reforzamiento de fibra de carbono CFRP "Asf"	Capacidad ϕM_n , según Diseño (KN-m)	Verificación
S/C 500 Kg/m ²	5,700	1 lámina ancho = 5,00 cm espesor = 0,165 mm	8,698	OK
S/C 1000 Kg/m ²	8,895	1 lámina ancho = 10,00 cm espesor = 0,165 mm	13,072	OK
S/C 1500 Kg/m ²	12,261	1 lámina ancho = 15,00 cm espesor = 0,165 mm	17,384	OK

Se elaboraron los especímenes para su ensayo, y, a través de una carga puntual P, se comparan los momentos obtenidos del diseño para la condición inicial. A continuación, se muestran imágenes tomadas durante el proceso elaboración de las vigas; estas idealmente deben tener las mismas características para que el reforzamiento de fibra de carbono CFRP empiece en las mismas condiciones.



Figura 6. Molde de madera (encofrado) con el refuerzo ya colocado.



Figura 7. Vaciado y acabado de las vigas objetos de estudio



Figura 8. Ejecución del tratamiento de la superficie de unión

Los especímenes obtenidos fueron 3 vigas patrón (sin refuerzo CFRP), 4 vigas con refuerzo CFRP de 5 cm, 4 vigas con refuerzo CFRP de 10 cm y 4 vigas con refuerzo CFRP de 15 cm. Posteriormente, se procedió al ensayo.



Figura 9. Vigas preparadas para ensayo.

Para el ensayo de las vigas, se utilizó una máquina universal con carga monotónica (estática) y como apoyo se usaron dos perfiles metálicos de sección tipo W y rodillos de acero de alta resistencia, y cuando se tuvieron las vigas preparadas se procedió a sus ensayos.



Figura 10. Montaje del ensayo, para viga patrón

RESULTADOS

Una vez realizados los ensayos, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3, en la que se indica la carga puntual aplicada P para cada viga, y a través del dato de la longitud ($L = 145$ cm) se puede obtener el momento flector resistente Mn_c .

Tabla 3. Resultados de ensayos y Momento flector Resistente para cada espécimen Mn_c

RESULTADOS DE ENSAYO				
GRUPO DE ENSAYO	MUESTRA	Carga Puntual P (Kg)	Mom. Flector Resist. Mn_c (Kg-cm)	Momento flector Resistente Mn_c (KN-m)
MUESTRA 1 INICIAL S/C 200	M1-1	2393,65	86769,81	8,51
	M1-2	2354,41	85347,36	8,37
	M1-3	2236,69	81080,01	7,95
MUESTRA 2 S/C 500 1 lámina ancho = 5,00 cm espesor = 0,165 mm	M2-1	2374,03	86058,59	8,44
	M2-2	2393,65	86769,81	8,51
	M2-3	2491,75	90325,94	8,86
	M2-4	2040,49	73967,76	7,25
MUESTRA 3 S/C 1000 1 lámina ancho = 10,00 cm espesor = 0,165 mm	M3-1	2648,71	96015,74	9,42
	M3-2	2825,3	102417,13	10,04
	M3-3	2609,47	94593,29	9,28
	M3-4	2668,33	96726,96	9,49
MUESTRA 4 S/C 1500 1 lámina ancho = 15,00 cm espesor = 0,165 mm	M4-1	2746,82	99572,23	9,76
	M4-2	2766,44	100283,45	9,83
	M4-3	2570,23	93170,84	9,14
	M4-4	2903,78	105262,03	10,32

Se puede observar la influencia que proporcionó el refuerzo de fibra de carbono CFRP sobre la resistencia a flexión. Los resultados se muestran en la tabla 4:

Tabla 4. Influencia de la fibra de carbono CFRP sobre la resistencia a flexión

GRUPO DE ENSAYO	Cantidad de refuerzo CFRP	Área de CFRP (mm ²)	Mom. Resistente Promedio (KN-m)	Variación con respecto al estado inicial (%)
-----------------	---------------------------	---------------------------------	---------------------------------	--

MUESTRA 1 INICIAL S/C 200			8,28		
MUESTRA 2 S/C 500	1 lámina ancho = 5,00 cm espesor = 0,165 mm	8,25	8,60	3,93 %	
MUESTRA 3 S/C 1000	1 lámina ancho = 10,00 cm espesor = 0,165 mm	16,5	9,56	15,45 %	
MUESTRA 4 S/C 1500	1 lámina ancho = 15,00 cm espesor = 0,165 mm	24,75	9,76	17,98 %	

Con base en los resultados de los ensayos, se puede comparar el momento resistente promedio con los resultados de la capacidad a flexión, que se obtienen del diseño según el procedimiento que indica el ACI 440.2R-08, lo que ayuda a observar el grado de precisión de los cálculos, además de poder explicar la diferencia que pueda existir entre ambas. Estos resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Comparación de los momentos resistentes entre resultados experimentales y resultados de diseño

GRUPO DE ENSAYO	Cantidad de refuerzo CFRP	Área de CFRP (mm ²)	Mom. Resistente Prom. de ensayos M_{n_e} (KN-m)	Momento flector Resistente de diseño (KN-m)	Eficiencia
MUESTRA 2 S/C 500	1 lámina ancho = 5,00 cm espesor = 0,165 mm	8,25	8,60	8,698	0,99
MUESTRA 3 S/C 1000	1 lámina ancho = 10,00 cm espesor = 0,165 mm	16,5	9,56	13,072	0,73

MUESTRA 4 S/C 1500	1 lámina				
	ancho = 15,00 cm	24,75	9,76	17,384	0,56
	espesor = 0,165 mm				

DISCUSIÓN

Los resultados experimentales indican que el refuerzo de fibra de carbono CFRP mejora la capacidad a flexión de las vigas. De la información de los datos de la tabla 4, se observan un aumento del 3,93 %, 15,45 % y 17,98 % para las vigas que fueron reforzadas con las láminas CFRP de anchos 5 cm, 10 cm y 15 cm, respectivamente. A partir de resultados similares, [Alegre \(2017\)](#) concluye que la fibra de Carbono CFRP aumenta la resistencia de las secciones de concreto armado sometida a flexión; el porcentaje de incremento de la resistencia, depende también de la cantidad de refuerzo CFRP que se le coloca a la sección. Por su parte, [Aquino y Mosquera \(2019\)](#) investigan la influencia del refuerzo externo de bandas CFRP en la resistencia a flexión de vigas de concreto armado, utilizando, para ello, un área de refuerzo de 60 mm² (láminas de 50 mm de ancho por 1,2 mm de espesor), y obtiene un incremento de la resistencia de entre 59,80% y 63,60% para dos distintas resistencias del concreto. Si se tiene en cuenta el área de refuerzo CFRP máximo utilizado en el presente trabajo, la cual fue de 24,75 mm² (150x0,165 mm), y se interpola los resultados de la última referencia, se obtendría un incremento de entre 24,67% y 26,24%. Si se compara con los resultados de la presente investigación, se observa que el porcentaje es ligeramente menor (17,98%).

Desde el punto de vista aplicativo, cuando se comparan los valores de capacidad resistente teóricos y los obtenidos por los ensayos, hay una diferencia considerable; ya que, según los datos de la tabla 5, la relación entre la capacidad de las vigas ensayadas y la capacidad teórica diseñada fue de 0,99, para una sobrecarga que pasó de ser 200 Kg/m² a 500 Kg/m²; para el caso de las muestras del grupo 3 (S/C de 1000 Kg/m²), se tuvo una relación de 0,73 y para el caso de las muestras del grupo 4 (S/C de 1500 Kg/m²), se tuvo una relación de 0,56, lo cual indica que los valores de diseño se deben reajustar con la finalidad de mejorar la aproximación del diseño a la realidad.

CONCLUSIONES

La resistencia a flexión de las vigas determinadas de manera teórica fue mayor que la resistencia obtenida de los resultados de los ensayos, por lo que se deberá ajustar para aproximarla a la realidad. Los resultados indican que la capacidad de las vigas patrón (sin refuerzo CFRP) es mayor que la capacidad obtenida del diseño teórico. Este resultado se puede explicar porque en el diseño teórico no se considera el aporte de los estribos, que, aunque fueron colocados para evitar que la viga falle por corte, estos aportan en la resistencia a compresión por el confinamiento que realizan en el núcleo interior de la sección transversal de la viga. Así, se comprobó que el refuerzo de fibra de carbono mejora la capacidad a flexión de las vigas, y que esa mejora depende de la cantidad de refuerzo CFRP que se coloca.

Si bien es cierto que se corroboró la mejora de la capacidad a flexión por influencia de la fibra de carbono CFRP, se evidenció que los casos ensayados no llegaron a la capacidad que fue obtenida con el diseño teórico. La relación entre ambas para el caso de vigas con 5 cm de ancho de refuerzo CFRP fue de 0,99; para el caso de las vigas con 10 cm de ancho de refuerzo CFRP, fue de 0,73, y para el caso de 15 cm de ancho fue de 0,56. Esto nos indicaría que se podría realizar el diseño de un refuerzo a través de normas internacionales, pero teniendo en cuenta que la realidad en nuestra zona es diferente; para ello, se tendría que afectar por un factor que permita aproximar el diseño teórico a la realidad; la propuesta es considerar a este factor conservadoramente como 0,55.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Concrete Institute. 2008. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills: ACI.

Alegre, G. 2017. *Estudio de la influencia en la resistencia y ductilidad de las fibras de carbono utilizadas como reforzamiento de vigas de concreto armado*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Perú.

Chávez, K. 2019. *Resistencia a Flexión en vigas de concreto simple empleando fibras de carbono como reforzamiento con diferentes anchos*. Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte, Cajamarca. Perú.

Contreras, L. 2017. *Análisis del Comportamiento de vigas de concreto reforzadas con fibra de*

Aplicación de fibra de carbono CFRP en el reforzamiento a flexión de vigas de experimentales de concreto armado en la ciudad de Huaraz
carbono. Tesis de Maestría. Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México.

Aquino, S.; Mosqueira, M. 2019. «Variación de la resistencia a la flexión de vigas de concreto armado al ser reforzadas con láminas de fibras de carbono (CFRP)» *Ciencia y Tecnología*, Vol. 15, N° 4, 75-86

Fecha de recepción

14/04/2021

Fecha de aceptación

10/05/2021

Correspondencia

Fernando Javier Depaz Hidalgo

fdepazh@unasam.edu.pe