

# INFLUENCIA DE FIBRA DE CARBONO EN VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO BAJO CARGAS DE FLEXIÓN

*Estudio del diseño estructural de vigas de hormigón armado reforzadas con fibras de carbono de alta resistencia y módulo de elasticidad con diferentes áreas de reforzamiento, modelando el material compuesto (CRFP) con software computacional.*

• **Daniela Alejandra Brizuela Valenzuela**

*Doctora en Innovación Tecnológica en Edificación, Ingeniería Civil en Obras Civiles Universidad Central de Chile.*

---

*En este trabajo se compara el comportamiento de vigas de hormigón armado sometidas a cargas de flexión en cuatro puntos cuando se refuerzan con Fibras de Carbono (CFRP) de alto módulo y de alta resistencia, a través de modelos computacionales basados en el método de elementos finitos. De este modo, los resultados permiten obtener la influencia del CFRP en el comportamiento estructural de los elementos analizados.*

*Los resultados obtenidos muestran un aumento en ductilidad en el comportamiento de las vigas modeladas a flexión cuando se refuerzan con distintos áreas de reforzamiento, lo que sugiere que la variable que condiciona la respuesta mecánica de los elementos reforzados y sometidos a estos tipos de sollicitación es la capacidad mecánica del refuerzo.*

## Introducción

El empleo de materiales compuestos formados por poliésteres reforzados con fibras (FRP) comenzó al finalizar la segunda guerra mundial en aplicaciones como la aeronáutica, y a finales de la década de 1980 su utilización llegó al sector de la construcción y las infraestructuras [1].

En los últimos años esta técnica ha alcanzado una gran difusión tanto a nivel experimental como en aplicaciones prácticas [2]. Entre las principales ventajas que justifican la importante difusión de este tipo de sistemas se encuentran su durabilidad, altísima relación resistencia-peso, bajo costo de mantenimiento y facilidad y rapidez de ejecución que permite su colocación interfiriendo relativamente poco el servicio de la estructura [3].

Los FRP con fibras de carbono (CFRP) son los compuestos más empleados en la práctica y los que despiertan un mayor interés para los investigadores. En función del proceso de fabricación, se pueden obtener fibras de carbono con distintas propiedades mecánicas, siendo el reforzamiento de vigas de hormigón armado mediante FRP una técnica consolidada tanto a nivel de realizaciones prácticas como a nivel de investigación.

Sin embargo, aún existen cuestiones en las que todavía no existe el suficiente consenso, existen diversos procedimientos para incrementar la resistencia y ductilidades de vigas de hormigón armado como, por ejemplo, mediante el aumento de la cuantía de acero o calidad de hormigón, o incremento de la sección resistente y, por tanto, la ductilidad. Mediante el reforzamiento del hormigón armado cuando está sometido a flexión se consigue incrementar la capacidad mecánica y la ductilidad del hormigón existente.

## Desarrollo

Para comprobar el comportamiento de las fibras cuando se emplean como refuerzo de vigas de hormigón armado, se han modelado en el programa computacional SAP2000, seis vigas de 1600 mm de longitud y sección de 180 mm de ancho y 180 mm de altura. El hormigón tiene una tensión media de rotura de 25 MPa. No se han dispuesto estribos. El acero empleado para el armado es de la calidad A630-420H, es decir, límite tensión de fluencia de 420 MPa. Cuatro de las vigas se han modelado considerando un reforzamiento externo de CFRP con distinto ancho de reforzamiento ( $w_r$ ), una de las restantes, se ha modelado considerando como armadura longitudinal  $A_{s,min}$  y la otra  $A_{s,max}$ .

Las vigas se han dispuesto bi-apoyadas y se han ensayado a flexión, siguiendo los requerimientos de la NCh 1038 [4] con dos cargas puntuales de 1800 kg, distanciadas a  $L/3$  una de la otra. Las cargas aplicadas corresponden a la carga en que se produce la falla de la viga por flexión, cuando se encuentra reforzada longitudinalmente con armadura mínima. El diseño se realiza siguiendo las recomendaciones del código ACI 318 [5] y ACI 440 [6], considerando un recubrimiento de 2 cm. En la Figura 1, se muestra un esquema de las vigas modeladas, y de la disposición de la aplicación de cargas.

Se ha modelado el reforzamiento externo (CFRP) con el tejido de fibra de carbono unidireccional de la empresa MAPEI de nombre comercial C-UNI-AX. Las características geométricas y mecánicas del tejido se indican en la Tabla 1.

	e (mm)	$\sigma_r$ (MPa)	E (GPa)	$\epsilon_{fu}$ (%)	$F_r$ (N/mm)	$K_r$ (kN/mm)
C-UNI-AX	0.166	4830	230	2.1	801.8	38.2

**Tabla 1:** Característica geométrica y mecánica del tejido empleado

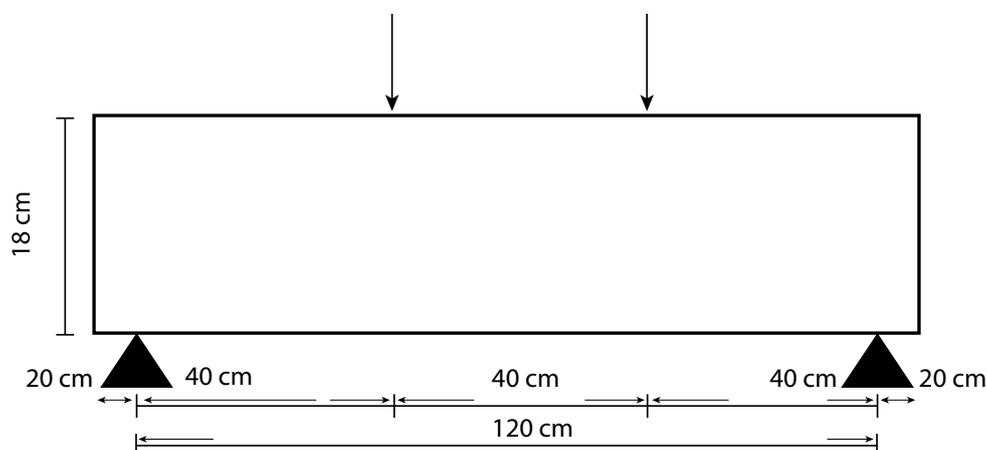
Donde  $e$  es el espesor del tejido,  $\sigma_r$  la tensión de rotura a tracción,  $E$  el módulo de elasticidad longitudinal,  $\epsilon_{fu}$  la deformación última a tracción,  $F_r$  la capacidad mecánica de la fibra a tracción por unidad de longitud y  $K_r$  la rigidez de la fibra a tracción por unidad de longitud.

## Modelo para reforzamiento de vigas de hormigón armado

Uno de los modelos más empleados en la práctica para predecir la tensión de rotura de elementos de hormigón armado reforzado con CFRP es el modelo de ACI440 [5]. Este modelo limita mediante la ecuación 1 la capacidad de deformación de la fibra desde su deformación última  $f_u$  a su deformación de diseño  $f_d$ , para prevenir fallos por arrancamiento o despegue del hormigón en función de la resistencia a compresión del hormigón  $f_c$ , el número de capas de la fibra  $n$ , su módulo de elasticidad  $E_f$  y su espesor. Esta expresión se basa en los trabajos de Teng et al. (2003) [7–8] que analizaron una gran cantidad de ensayos existentes.

[1]

$$\epsilon_{fd} = \sqrt{\frac{f_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu}$$

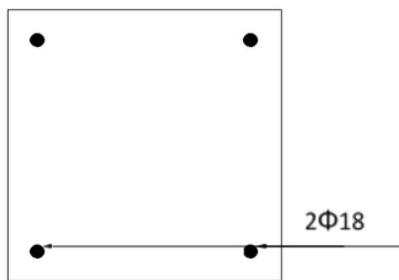


**Figura 1**

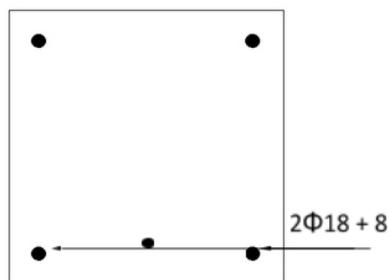
Esquema disposición de aplicación de cargas

La ductilidad se conoce como la característica particular de algún elemento estructural, de soportar deformaciones en su fase inelástica sin llegar a su ruptura. Una de las utilidades de la ductilidad de los elementos de hormigón armado, es predecir la capacidad última del elemento, que es un criterio clave para el diseño estructural. Para calcular la ductilidad se deben considerar las curvaturas asociadas al momento último y al momento plástico de la sección de estudio.

Siguiendo el modelo de diseño del código ACI318, ACI440 y realizando un modelo computacional de las vigas y del CRFP utilizando el programa computacional SAP200, se obtienen las distancias al eje neutro, momentos nominales, tensiones del concreto, acero y curvatura para el caso de estudio. Los casos analizados son los que se observan en las Figura 2 y Figura 3:



a) Sección con acero mínimo



b) Sección con acero máximo

Figura 2

Esquema de vigas de hormigón armado sin reforzamiento externo. a) sección con  $A_{s,min}$ ; b) sección con  $A_{s,máx}$

De todo lo anterior se obtuvo curvaturas (ver Tabla 3) para los tres estados en donde el material compuesto (hormigón armado, más CRFP) pasa de un estado a otro mientras se le aplica las cargas antes señaladas:

En donde los puntos de la curva momento – curvatura de las secciones de estudio los cuales se observan en la Figura N° 4.

#### Análisis

En la Tabla 2 y a partir de los resultados obtenidos se compara porcentualmente las curvaturas y momentos de las vigas reforzadas, con respecto a la sección armada con cuantía de acero mínima.

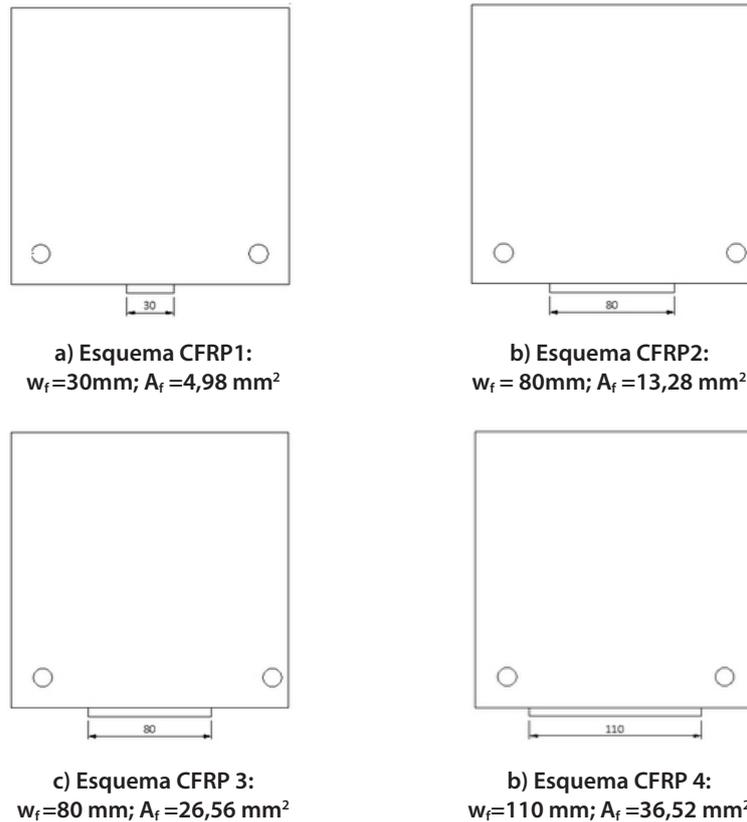


Figura 3

Configuraciones para vigas de hormigón armado reforzadas exteriormente con CRFP.

Con:

Tabla 2: Áreas de acero, espesores, anchos de reforzamiento y áreas de reforzamiento externo.

Sección	df [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	tf [mm]	Wf [mm]	Af[mm <sup>2</sup> ]
CFRP 1	180	100	0,166	30	4,980
CFRP 2	180	100	0,166	80	13,28
CFRP 3	180	100	0,332	80	26,50
CFRP 4	180	100	0,166	110	36,50

Tabla 3: Puntos del diagrama M- f

Sección As,min	Fluencia		Endurecimiento		Ruptura	
	curvatura (1/cm)	Momento (kg-cm)	curvatura (1/cm)	Momento (kg-cm)	curvatura (1/cm)	Momento (kg-cm)
CFRP 1	0,000177	110391	0,00042	120268	0,00231	136881
CFRP 2	0,000128	83011	0,000319	127393	0,000677	140058
CFRP 3	0,000128	87262	0,000319	140780	0,000693	170240
CFRP 4	0,000128	93884	0,000319	161037	0,000574	188894
$A_{s,máx}$	0,000128	98789	0,000319	175575	0,000523	253586
	0,000144	197599	0,000359	278012	0,000513	278220

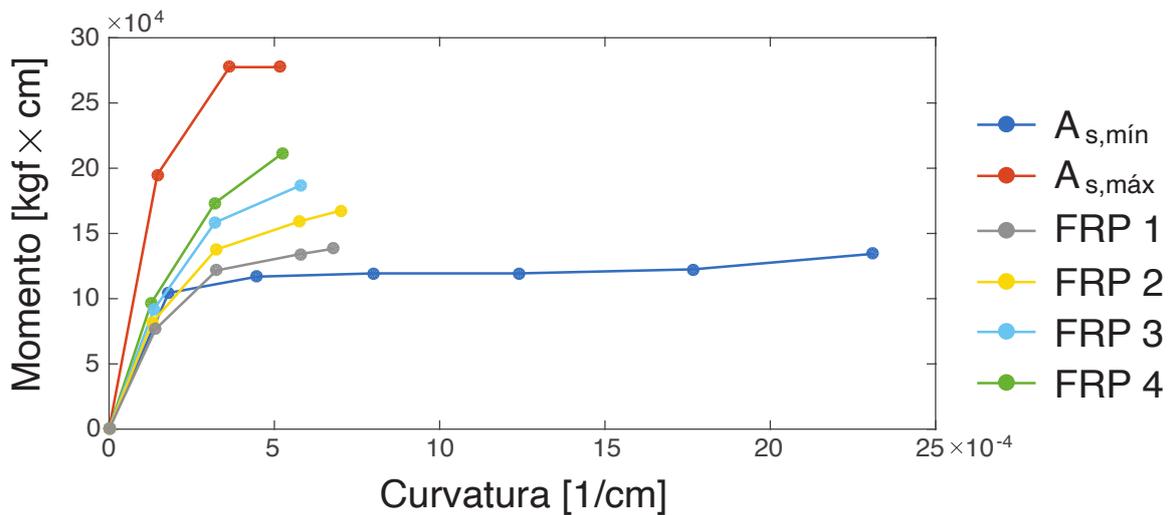


Figura 4

Diagrama Momento - curvatura.

De lo anterior se puede desprender que la curvatura que tienen las vigas reforzadas externamente en el instante que comienzan a fluir, decrece un 28% con respecto a la curvatura que tiene la viga reforzada con  $A_{s,min}$ . La sección que está reforzada con  $A_{s,máx}$  con respecto a la sección de  $A_{s,min}$ , tiene una curvatura 19% más baja en el instante que comienza a fluir. Mientras que el porcentaje de todas estas cuando entran en la fase de ruptura disminuye al aumentar el área de refuerzo de CFRP. Este porcentaje varía entre 70% y 77%.

Finalmente para las vigas con sección transversal con  $A_{s,máx}$  la variación es de 78%, con respecto a la curvatura de la sección reforzada con  $A_{s,min}$ .

Las diferencias que ocurren con las variaciones porcentuales del momento de fluencia entre la viga con  $A_{s,min}$  y las vigas armadas con  $A_{s,máx}$  y reforzadas con CFRP, disminuyen en un 25% cuando están reforzadas externamente en un 12% de total de la cara tracciona, 21% cuando este reforzamiento cubre el 22% de la cara traccionada, disminuye en un 15% cuando se le instalan dos capas de este tejido y baja un 11% cuando el ancho del tejido utilizado aumenta de 80 mm a 110 mm. Sin embargo, para la sección  $A_{s,máx}$ , con respecto a la sección armada con  $A_{s,min}$  el momento incrementa en un 79% en el instante en que la viga comienza a fluir.

Se observa que las variaciones porcentuales del momento de ruptura entre la viga con armadura  $A_{s,min}$  y las vigas con  $A_{s,máx}$  con respecto a las que se les incorpora el refuerzo de CFRP, tienen un incremento de un 2% cuando se refuerzan externamente con un ancho de tejido de 30 mm, un 24% reforzada con un aumento en el área de tejido utilizada en el reforzamiento externo incrementando desde 30 mm a

Tabla 4: Comparación porcentual con respecto a la armadura mínima

Sección $A_{s,min}$	Fluencia		Endurecimiento		Ruptura	
	curvatura (%)	Momento (%)	curvatura (%)	Momento (%)	curvatura (%)	Momento (%)
CFRP 1	-28%	25%	-28%	6%	-71%	2%
CFRP 2	-28%	21%	-28%	17%	-70%	24%
CFRP 3	-28%	15%	-28%	34%	-75%	38%
CFRP 4	-28%	11%	-28%	46%	-77%	85%
$A_{s,máx}$	-19%	79%	-19%	131%	-78%	103%

Tabla 5: Ductilidad con respecto a cuantía mínima.

Sección	Área CFRP [mm <sup>2</sup> ]	Ductilidad	Duc/res. $A_{s,min}$ .
$A_{s,min}$	0	2,1-E-8	0%
CFRP 1	4,98	6,1-E-9	-71%
CFRP 2	13,28	6,3-E-9	-70%
CFRP 3	26,56	5,2-E-9	-75%
CFRP 4	36,52	4,7-E-9	-77%
$A_{s,máx}$	0	4,6-E-9	-78%

80 mm, un 38% cuando se refuerza con un aprovechamiento del tejido de un 2.3 y dos capas de fibra y de un 61% cuando el tejido externo aumenta en un 38%; y en 103% en la sección transversal que está reforzada longitudinalmente con cuantía máxima de acero.

Con respecto a la ductilidad en la Tabla 5, se pueden apreciar las ductilidades de cada una de las secciones analizadas y la comparación de cada una de estas con respecto a las vigas reforzadas con  $A_{s,min}$  sin refuerzo externo en donde se produce una disminución que varía entre un 71% y un 78% con respecto a las vigas patrón.

### Conclusiones

Se logra apreciar que las vigas reforzadas externamente con distintos anchos de tejido de alta resistencia y altísimo módulo de elasticidad de CFRP en la cara más traccionada y que son analizadas de forma analítica utilizando un software computacional de uso tradicional en la ingeniería estructural es una alternativa de diseño, rehabilitación estruc-

tural o incluso una forma de validación del método de cálculo sugerido por código ACI440-17, pudiendo constatar analíticamente que se puede diseñar o rehabilitar una estructura sometida a esfuerzos de flexión, que pueden o no tener distintas condiciones de carga, condiciones climáticas, considerando la durabilidad y serviciabilidad en su vida útil, porque los resultados analizados reflejan un aumento en la ductilidad del elemento analizado y con ende también la resistencia de este.

El porcentaje máximo del incremento de la resistencia en flexión de las vigas analizadas es de un 2%, la cual satisface la demanda de momento generada por las cargas respecto al cortante nominal de la sección. El incremento de área de refuerzo que se asocia al 2% del incremento en su resistencia en flexión es de  $A_f=4.98 \text{ mm}^2$ .

A partir de lo mencionado recientemente, se considera que no es necesario incrementar el área de refuerzo, debido a que la capacidad de la sección transversal de cualquiera de las vigas en estudio se ve superada por por cargas que generan una mayor flexión por tracción.

#### Referencias

[1] Pendhari, S.S.; Kant, T.; Desai, Y.M. Application of polymer composites in civil construction: A general review. Compos

Struct. 2008, 24, 84-114. <https://doi.org/10.1016/j.comps-struct.2007.06.007>.

[2] Zeng, J.J.; Lin, G.; Teng, J.G.; Li, L.J. Behavior of large-scale FRP-confined rectangular RC columns under axial compression. Eng Struct. 2018, 174, 629-645. <https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2018.07.086>.

[3] Chavla, K.K. Composite materials 1980: a report on the 3rd International Conference on composite materials, Paris, August 26-29, 1980. Materials Science and Engineering. 1981, 48, 137-141. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(81\)90073-2](https://doi.org/10.1016/0025-5416(81)90073-2)

[4] Instituto Nacional de Normalización. Norma Chilena 1038:2009 – Hormigones – Ensayo de tracción por flexión.

[5] Comité ACI318. Requisitos de diseño de reglamento para concreto estructural (ACI 318). American Concrete Institute. 2014.

[6] ACI 440.2 R-17. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 2017. 2017.

[7] Teng, J.G.; Lu, X.Z.; Ye, L.P.; Jiang, J.J. Recent Research on Intermediate Crack Induced Debonding in FRP Strengthening Beams. In Proceeding of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials for Bridges and Structures, Cargaly, AB, Canada, 2004.

[8] Teng, J.G.; Smith, S.T.; Yao, J.; Chen, J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. Constr Build Mater. 2003, 17, 447-462.

[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(03\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(03)00043-6).



Universidad  
Central

# Admisión 2022



## FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

### ESCUELA DE INGENIERÍA

Ingeniería Civil en Obras Civiles (Santiago)

Ingeniería en Construcción (Santiago)

Ingeniería Civil en Minas (Santiago - La Serena)

Geología (Santiago)

Ingeniería Civil Industrial (Santiago- La Serena)

Ingeniería Civil en Computación e Informática (Santiago- La Serena)

Licenciatura en Astronomía (La Serena)

[Ingresa Aquí](#)



UNIVERSIDAD CENTRAL  
ACREDITADA EN NIVEL AVANZADO  
EN LAS ÁREAS DE GESTIÓN INSTITUCIONAL, DOCENCIA DE PREGRADO,  
VINCULACIÓN CON EL MEDIO HASTA ENERO 2026

A pasos de estaciones de Metro   
Toesca, Parque Almagro y Moneda

600 582 2222

[admision@ucentral.cl](mailto:admision@ucentral.cl)