

COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADAS A CORTANTE CON TEJIDOS DE FIBRAS DE CARBONO O BASALTO

Picazo, A^{1*}, Cobo, A¹

(1) *Universidad Politécnica. E.U. Arquitectura Técnica. Departamento Tecnología de Edificación. Grupo de Investigación U.P.M. Patología de Estructuras, Protecciones Colectivas y Medios Auxiliares de Edificación, Madrid, España.*

RESUMEN:

El objetivo principal ha sido estudiar el comportamiento de vigas de hormigón reforzadas a cortante con tejidos de fibra de carbono o basalto pegados con resinas epoxi. Se han planteado objetivos parciales como el análisis de la fisuración y de los movimientos en las vigas y la comparación del comportamiento mecánico de los sistemas de refuerzo estudiados.

La metodología empleada ha sido experimental, realizándose vigas de hormigón en masa reforzadas inferiormente con tejido de fibra de carbono. Las vigas se han reforzado a cortante con tejidos de fibra de carbono o basalto. Se han comparado los resultados experimentales con los teóricos, obtenidos mediante la formulación analítica existente. Los resultados demuestran que las vigas reforzadas ofrecen un comportamiento significativamente superior al de las vigas sin refuerzo, tanto en el valor de las cargas últimas como en la ductilidad de las piezas. Además la rigidez prevista hasta fisuración es superior a la obtenida experimentalmente. Los resultados obtenidos nos permiten concluir que de la formulación aditiva propuesta por el *Fib* Bulletin 14 no se obtienen buenos resultados y que la formulación existente en diversas normativas vigentes para el cálculo de la resistencia a cortante del hormigón resulta conservadora.

Palabras clave: Hormigón, cortante, refuerzo, FRP, *fib* Bulletin 14.

BEHAVIOR OF CONCRETE BEAMS REINFORCED FOR SHEAR LOADS WITH CARBON OR BASALT FIBERS

ABSTRACT:

The main goal of this research consists on studying the response of concrete beams reinforced for shear loads with carbon or basalt fibers, glued by means of epoxy resin. Two partial goals have been set in this analysis: (i) cracks and displacements monitoring along the beams, and (ii) the mechanical behavior of the reinforcement system under study.

The methodology established for this study was based on experimentation, with field tests performed on carbon fiber-reinforced concrete beams. The reinforcement chosen was made of carbon/basalt fibers for improving shear strength. Test results have been compared to analytic calculations using state-of-the-art computational models. The results of this study show that fiber-reinforced beams show a greater strength compared to non-reinforced beams in terms of both limit loads and plastic deformability. Furthermore the forecast for stiffness evolution until cracking is better off than the one measured on the field tests. As a conclusion we can state that the additive formulation proposed in *Fib* Bulletin 14 is not good enough in this case and that the formulae used in most norms currently applied for these calculations seem to be mostly conservative in this respect.

Keywords: Concrete, shear, reinforced, FRP, *fib* Bulletin 14.

* a.picazo@upm.es

1. Introducción

La técnica del refuerzo de piezas de hormigón mediante fibras adheridas exteriormente se lleva estudiando desde hace más de treinta años [7]. Las recomendaciones y guías de diseño elaboradas por organismos de reconocido prestigio como la Federación Internacional del Hormigón "FIB" [5] o el Instituto Americano del Hormigón "ACI" [1] son los documentos que usualmente se emplean para dimensionar y ejecutar refuerzos con este tipo de materiales.

En los documentos citados anteriormente [5] y [1] se desarrolla con detalle el procedimiento de dimensionamiento a flexión, utilizando las fibras como armadura longitudinal [6], o a compresión, empleando el efecto beneficioso del confinamiento del hormigón mediante las fibras [2]. Sin embargo el refuerzo a cortante se trata de manera somera, lo que implica adoptar precauciones en su dimensionamiento y su aplicación [8].

Berset, [3] desarrolló un programa experimental en el que se estudió el comportamiento a cortante de vigas de hormigón armado reforzadas con fibras adheridas exteriormente.

Se realizaron seis vigas, de 750 mm de longitud, las dos primeras sin reforzar y las otras cuatro reforzadas con fibra de vidrio (fig.1). El refuerzo de fibra se dispone en la práctica totalidad de los laterales de las vigas, con una orientación de las fibras perpendicular a la dirección de las tensiones principales de cortante.

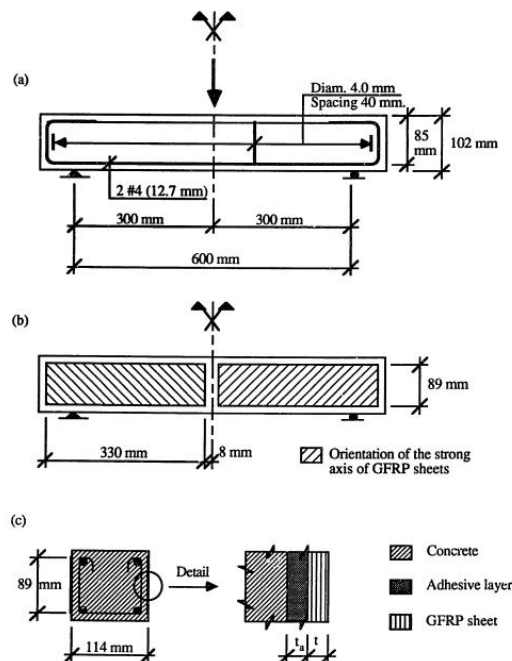


Figura 1. Geometría y disposición de barras y refuerzos en las vigas ensayadas por Berset.

El máximo cortante se estima, según Berset, con (ec. 1), mientras que el cortante resistido por el hormigón puede calcularse, según ACI 1989, como (ec. 2).

$$V = 0,9df_y A_s \frac{4}{L} \quad (1)$$

$$V_c = 59 \left(f'_c \rho \frac{d}{a} \right)^{1/3} A_c \quad (2)$$

Siendo:

d el canto útil (mm)

f_y es la resistencia del acero (N/mm^2)

A_s el área de la armadura de acero (mm^2)

L la luz de cálculo (mm)

f'_c es la resistencia a compresión del hormigón (N/mm^2)

ρ es la cuantía de acero

a es la longitud del vano de cortante (mm)

A_c es el área de la sección de hormigón (mm^2)

Además la resistencia a cortante de la fibra se establece según la fórmula indicada en la expresión (ec.3), muy parecida a la que hoy en día se emplea para dicho cálculo.

$$V_{fc} = 2\sigma_{fc}tz(ctg\alpha + ctg\beta)\sin\beta \quad (3)$$

Siendo:

V_{fc} es el cortante soportado por la fibra (N)

σ_{fc} es la tensión de rotura de la fibra empleada (N/mm²)

t el espesor de la fibra de refuerzo (mm)

z la distancia del centro de compresiones del hormigón al refuerzo longitudinal (mm)

α es el ángulo de inclinación de la rotura

β es la orientación de la dirección principal de las fibras dispuestas con relación a la directriz de la pieza

Posteriormente la Federación Internacional del Hormigón "FIB" desarrolló en 2001 [2] una formulación específica para el cálculo de elementos de hormigón reforzados con fibras externamente. En dicha formulación se indica, de acuerdo con el Eurocódigo 2 [8] que los refuerzos exteriores de fibras poliméricas deben ser tratados de manera análoga a lo dispuesto con el acero del hormigón armado. Así la resistencia a cortante de un elemento reforzado se puede calcular según la fórmula (ec.4) como suma de las resistencias a cortante del hormigón, de la armadura de cortante y de la contribución a cortante del FRP, no sobrepasando al máximo esfuerzo de cálculo a cortante que pueda soportarse sin rotura por compresión en el alma; V_{Rd2} (ec.5).

$$V_{Rd} = \min(V_{cd} + V_{wd} + V_{fd}, V_{Rd2}) \quad (4)$$

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2}nf_{cd}b_w0,9d \quad (5)$$

Siendo:

V_{cd} la resistencia a cortante del hormigón, según la fórmula (ec.6)

V_{wd} la contribución de la armadura de cortante, según (ec.7)

V_{fd} la contribución de la fibra a cortante, según (ec.8)

n el factor de eficacia; $n = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5$

$$V_{cd} = \left[\tau_{Rd}k(1,2 + 40\rho_1) + 0,15\frac{N_{sd}}{A_c} \right] b_w d \quad (6)$$

$$k = 1,6 - d \geq 1$$

Siendo:

τ_{Rd} la resistencia de cálculo básica a cortante (Tabla 1)

ρ_1 la cuantía de la armadura de tracción

N_{sd} esfuerzo axial en la sección

A_c área de la sección de hormigón

b_w ancho de la sección

d canto útil de la pieza

f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
τ_{Rd}	0,18	0,22	0,26	0,30	0,34	0,37	0,41	0,44	0,48

Tabla 1. Valores de τ_{Rd} (N/mm²), con $\gamma_c=1,5$, para diferentes resistencias.

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s}0,9df_{ywd} \quad (7)$$

Con:

A_{sw} el área de la sección transversal de la armadura de cortante

s la separación entre estribos

f_{ywd} el límite elástico de cálculo de la armadura de cortante

La contribución del FRP a capacidad cortante se puede escribir mediante la expresión (ec.8)

$$V_{fd} = 0,9\varepsilon_{fd,e}E_{fu}\rho_f b_w d(\cot\theta + \cot\alpha)\sin\alpha \quad (8)$$

Siendo:

$\varepsilon_{fd,e}$ la deformación efectiva de cálculo del FRP

E_{fu} el módulo de elasticidad del FRP en su dirección principal

ρ_f la cuantía del FRP

b_w ancho de la sección

d canto útil de la pieza

θ es el ángulo de inclinación de la rotura

α es la orientación de la dirección principal de las fibras dispuestas con relación a la directriz de la pieza

2. Objetivos

En este trabajo se analiza el comportamiento a cortante de vigas de hormigón reforzadas con fibras de carbono o basalto pegadas exteriormente con resinas epoxi.

3. Trabajo experimental realizado

Para poder evaluar el comportamiento de las fibras de carbono y basalto como elementos de refuerzo adheridos al hormigón se ha procedido al refuerzo, mediante los citados materiales de seis de las siete vigas realizadas en el presente trabajo experimental, manteniendo la viga no reforzada como “de referencia”.

El trabajo se ha realizado estudiando el comportamiento estructural a dos niveles:

A nivel de barra, el trabajo se ha desarrollado experimentalmente, mediante el ensayo a tracción del tejido de carbono dispuesto para refuerzo “a flexión”.

A nivel de pieza el trabajo se ha desarrollado experimentalmente ensayando a flexión, hasta la rotura, siete vigas de hormigón de $100 \times 120 \text{ mm}^2$ de sección y 1.200 mm de longitud, simplemente apoyadas con una luz libre entre apoyos de 1.000 mm y aplicando la carga sobre dos puntos simétricos equidistantes 333 mm entre sí.

Todas las vigas se han “armado” longitudinalmente con tejido de fibra de carbono de 100 mm de ancho adherido en sus caras inferiores y testas. Para comprobar la eficacia de los tejidos de fibra de carbono y basalto como refuerzo a cortante, se ha adherido este material en los vanos de cortante como refuerzo en seis de las vigas anteriores, con las disposiciones indicadas (Tabla 2).

VIGA Nº	Amasada	Tejido Carbono Flexión; Ancho (mm)	Tejido Carbono Cortante; disposición	Tejido Basalto Cortante; disposición
1	1	10	Perimetral	-
2	1	10	-	Perimetral
3	2	10	En “U”	-
4	2	10	-	En “U”
5	3	10	Lateral	-
6	3	10	-	Lateral
8	4	10	-	-

Tabla 2. “Armado” longitudinal de carbono y refuerzos a cortante dispuestos en las vigas.

3.1. Materiales empleados. Descripción

3.1.1 Hormigón

Para conocer las características mecánicas del hormigón empleado en cada viga se han realizado para cada amasada dos probetas cilíndricas de $15 \times 30 \text{ cm}^2$ y se han sometido a compresión. La rotura se ha realizado en una prensa Icon 250 a una velocidad de 8,8 KN/sg. Los valores medios de la tensión de rotura a compresión para cada amasada oscilaron entre 15,56 y 30,26 MPa. Estos valores tan dispersos se han buscado, ya que la amasada de bajo valor se emplearía en las vigas reforzadas perimetralmente, mientras que la amasada de mayor resistencia se empleará en la viga no reforzada a cortante.

3.1.2 Tejido de fibra de carbono

Para la realización de la “armadura” longitudinal y la mitad de los refuerzos laterales a cortante se han empleado tejidos de fibra de carbono que han sido facilitados por la empresa *Drizoro, S.A.* Dicho tejido está compuesto de fibras de carbono dispuestas en una única dirección y unidas transversalmente por hilos de fibra de vidrio. La resistencia a tracción es de 3.400 MPa, el módulo de elasticidad 230.000 MPa y su espesor de 0,167 mm. Los tejidos han sido ensayados en una prensa Ibertest MIB 60/AM a una velocidad de 3 KN/sg. Es de destacar la alta resistencia de estos tejidos y su comportamiento extraordinariamente frágil. Todas las probetas rompen de manera explosiva. Se acompaña (fig.2) la gráfica fuerza-carrera obtenida en los ensayos de una probeta de tejido de carbono. La tensión de rotura en los ensayos osciló entre 2.439,80 y 4.405,95 MPa.

3.1.3 Tejido de fibra de basalto

Para la realización de la otra mitad de los refuerzos laterales a cortante se han empleado tejidos de fibra de basalto, igualmente facilitados por la empresa *Drizoro, S.A.* Dicho tejido está compuesto de fibras de basalto dispuestas en dirección longitudinal y unidas transversalmente por fibras del mismo material. Su espesor es de 0,103 mm, la resistencia a tracción es de 2.700 MPa y el módulo de elasticidad superior a 84.000 MPa.

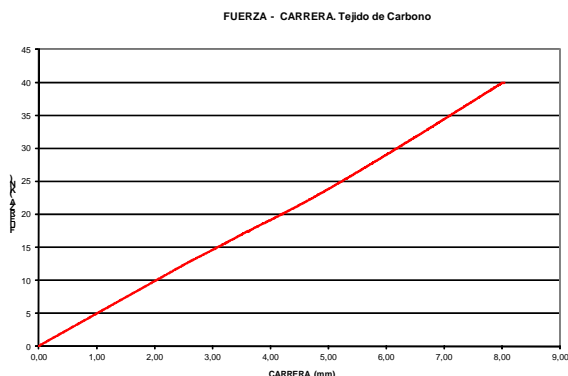


Figura 2. Gráfica fuerza-carrera de una probeta de tejido de carbono.

3.2. Realización de las vigas

Una vez realizadas las vigas de hormigón se procedió a la realización del refuerzo exterior de las mismas, tanto aplicando el tejido longitudinal de carbono en la cara inferior y testas como los tejidos de fibras para refuerzo a cortante colocados perimetralmente, en “U” y lateralmente.

Para la aplicación de los tejidos previamente hubo que preparar la base del hormigón mediante un lijado, hasta conseguir una textura parecida a la de un papel de lija y posterior limpieza para conseguir una correcta adherencia entre el hormigón, la resina epoxi y los tejidos. Tras la preparación del soporte se procede a la aplicación de la resina epoxi, mediante rodillo, sobre el hormigón, colocando sobre la resina fresca el tejido de fibra. Mediante la aplicación de presión, con un rodillo empapado en el adhesivo, se procede a adherir el tejido de fibra de manera que se eliminen todas las oclusiones de aire y cubriendo el tejido con la propia resina, hasta que quede todo el tejido completamente adherido y saturado de adhesivo. Las vigas, tras el secado del adhesivo, se encuentran de esta manera listas para ser ensayadas.

Como índice gráfico de las vigas realizadas se incluye la (fig.3) que muestra las tres distintas formas de refuerzo a cortante que se han realizado en correspondencia con lo indicado anteriormente en la (Tabla 2).

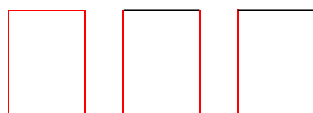


Figura 3. Definición gráfica de los refuerzos a cortante; perimetral, en “U” y lateral.

4. Resultados

Se pasa revista a continuación a los resultados obtenidos en los siete ensayos de las vigas estudiadas, dándose los datos (Tabla 3) y complementando dicha tabla con el gráfico fuerza-carrera (fig.4) de las vigas.

Viga	Q_u (KN)	f a l/3 (mm)	Q_{fis} (KN)	f_{fis} a l/3 (mm)	E (KNm)
1	21,59	15,00	6,44	0,64	0,211
2	29,92	20,79	6,67	0,68	0,385
3	17,26	11,99	5,42	0,31	0,140
4	27,51	19,12	6,03	0,68	0,401
5	16,83	11,69	3,13	0,19	0,275
6	25,70	17,85	10,18	0,62	0,408
8	22,10	15,36	8,03	0,72	0,430

Tabla 3. Resultados de los ensayos de las siete vigas estudiadas. Q_u es la carga última de rotura de la prensa, f la flecha para la carga de rotura a l/3, Q_{fis} la carga para el momento de fisuración, f_{fis} la flecha en el momento de fisuración a l/3 y E la energía absorbida en el ensayo.

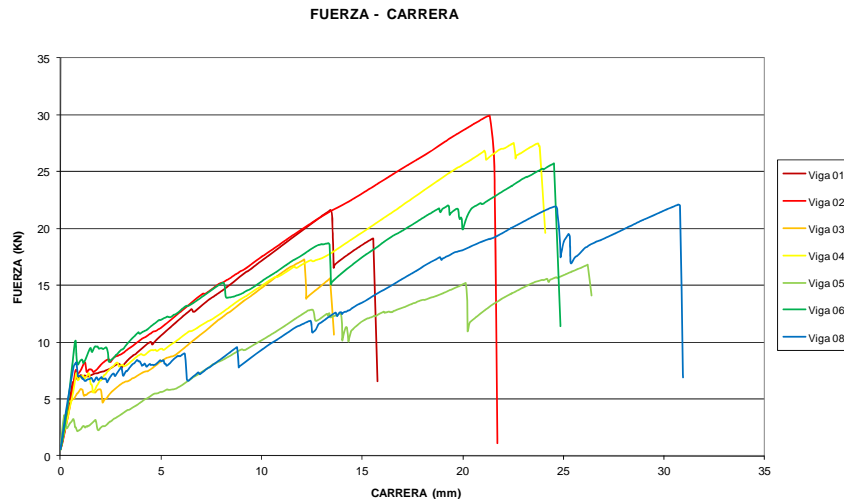


Figura 4. Gráfica fuerza-desplazamiento experimental de las vigas ensayadas.

4.1. Comportamientos estructurales de las vigas

4.1.1 Comportamiento de la viga 1

Se produce rotura a tracción de la banda de fibra inferior de carbono, junto con un despegue de dicha banda en la zona situada entre las zonas reforzadas a cortante. Presenta grietas verticales, una en la zona central de hormigón sin reforzar y otra en la zona con disposición de fibra vertical.

4.1.2 Comportamiento de la viga 2

El colapso se produce a flexión por rotura de la fibra inferior de tejido de carbono, junto con un despegue de esta fibra en una longitud de unos 34 cm. Al romper la fibra inferior de carbono la sección correspondiente parte dividiendo la viga en dos. En el diagrama carga-flecha se aprecia perfectamente el momento en el que se inicia la fisuración, por el cambio de pendiente del diagrama.

4.1.3 Comportamiento de la viga 3

Rotura de la fibra inferior de carbono por tracción, justamente en la zona donde comienza el refuerzo lateral a cortante. Se produce fisuración de apertura importante antes de la rotura y, a la par que la rotura, se produce un despegue de la fibra de la zona central inferior.

4.1.4 Comportamiento de la viga 4

Colapso por tracción de la fibra de carbono inferior, dividiendo la viga en dos tramos. La fibra de basalto dispuesta como refuerzo a cortante no rompe. En el momento en el que se produce la fisuración se marca el tramo horizontal en el diagrama carga-desplazamiento.

4.1.5 Comportamiento de la viga 5

La rotura se produce por despegue de la fibra de carbono traccionada. El despegue de dicha fibra se produce por el adhesivo, sin arrastre de hormigón, por lo que se puede decir que falla la resina epoxi. Antes del colapso se habían producido dos grietas apreciables, verticales, en las zonas centrales adyacentes a las bandas de tejido dispuestas para cortante. Dichas bandas de refuerzo a cortante no fallan. Posteriormente al fallo por despegue se produce la rotura de la fibra de carbono traccionada.

4.1.6 Comportamiento de la viga 6

Se produce rotura por tracción de la fibra inferior de carbono que produce que la viga se parta en dos inicialmente y posteriormente se produce el despegue de la fibra. Antes de la rotura se presentan fisuras verticales importantes en apertura. La viga no rompe a cortadura. Después de la rotura la banda inferior prácticamente se despega por completo.

4.1.7 Comportamiento de la viga 8

Colapso por tracción frágil con rotura de la fibra en la zona traccionada. Se presentan dos únicas grietas que progresan hasta la zona comprimida. Se produce la rotura del hormigón en la zona superior por aplastamiento.

4.2. Comparación entre los comportamientos estructurales de las vigas

4.2.1 Comparativo entre las vigas 1 y 2

Ambas vigas están realizadas con hormigón de la misma amasada con una resistencia media de 15,56 MPa y su diferencia radica en el material empleado para el refuerzo a cortante (Tabla 2). Al ser el refuerzo dispuesto del tipo perimetral este actúa además como anclaje de la fibra de carbono dispuesta a tracción. El resultado de los ensayos nos permite vislumbrar un

comportamiento estructural igual hasta el momento de fisuración y tras producirse este, justo hasta rotura. La diferencia radica en que la viga reforzada con basalto admite una mayor carga y desplazamiento, según los ensayos del orden de un 38 % más.

4.2.2 Comparativo entre las vigas 3 y 4

Realizadas con la misma amasada, con una resistencia del hormigón de 25,81 MPa y con un refuerzo en "U" a cortante ambas vigas mantienen un comportamiento estructural similar al descrito anteriormente para las vigas 1 y 2. Según la (fig. 4) se podría indicar que el comportamiento de la viga 3 es "paralelo" al de la viga 1 y lo mismo sucede con las vigas 4 y 2, pero produciéndose mayores desplazamientos para la misma carga, efecto que puede producirse por el tipo de refuerzo dispuesto a cortante.

4.2.3 Comparativo entre las vigas 5 y 6

La resistencia del hormigón empleado en estas vigas es similar al de las vigas 3 y 4, en cambio el refuerzo a cortante es lateral, lo que impide el anclaje del refuerzo inferior a flexión. La fisuración en la viga 5 se produce muy pronto, mientras que la viga 6 aumenta de manera considerable. Una vez pasado el instante de fisuración el comportamiento se puede considerar "paralelo", siempre admitiendo más carga la viga 6 para un mismo desplazamiento.

5. Conclusiones

Las vigas reforzadas a cortante con tejido de fibra de carbono o basalto poseen una ductilidad superior a la de las vigas sin reforzar.

Las vigas reforzadas a cortante con tejido de fibra de basalto permiten una mayor carga y deformación hasta la rotura que las reforzadas con fibra de carbono.

La disposición de los refuerzos a cortante mediante tejidos de fibras es muy importante.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACI 440.2R-02. 2002. "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Reported by ACI Committee 440. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- [2] AIRE, C., GETTU, R., CASAS, J.R., MARQUÉS, S., MARQUÉS, D. 2010. "Estudio Experimental y Teórico del Hormigón Confinado Lateralmente con Polímeros Reforzados con Fibras (FRP)". *Materiales de Construcción* vol. 60, 297, 19-31.
- [3] BERSET, J.D. 1992. "Strengthening of Reinforced Concrete Beams for Shear Using FRP Composites". *Master of science in civil engineering. Massachusetts institute of technology.*
- [4] COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN), prEN 1992-1. 2003. "Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings".
- [5] FIB BULLETIN 14. 2001. "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures". Task group 9.3. FRP reinforcement for concrete structures. Lausanne, Switzerland.
- [6] MARTÍNEZ, R. 1999. "Experiencias en la Utilización de Laminados de Material Compuesto a Base de Fibra de Carbono en el Refuerzo de Estructuras de Hormigón". *Jornada Nuevas Técnicas de Evaluación Estructural, Rehabilitación y Refuerzo de Estructuras. Grupo español del IABSE. Madrid.*
- [7] MARTÍNEZ, R. 2001. "Materiales para Refuerzo y Rehabilitación de Estructuras". CEMCO 2001. XV Curso de Estudios Mayores de la Construcción. Seminario S4. *Materiales Compuestos Avanzados en la Construcción. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.*
- [8] PERERA, R., VIQUE, J., ARTEAGA, A., DIEGO, A. 2009. "Diseño a Cortante de Vigas de Hormigón Armado y Armadura Externa de FRP Mediante el Mecanismo de Bielas y Tirantes y Algoritmos Genéticos". *Hormigón y acero* vol. 60, 254, 65-83.