

COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADAS A CORTANTE CON TEJIDOS DE FIBRAS DE CARBONO PEGADOS CON RESINA EPOXI

Álvaro PICAZO IRANZO^{1,a}

Máster U. en Técnicas y Sistemas de Edificación.

¹ Universidad Politécnica de Madrid. P.T.E.U.

^a Grupo de Investigación U.P.M. Investigador.

a.picazo@upm.es

Alfonso COBO ESCAMILLA^{1,a}

Dr. Ingeniero Industrial, Arquitecto, Arq. Técnico

¹ Universidad Politécnica de Madrid. C.E.U.

^a Grupo de Investigación U.P.M. Inv. Responsable

alfonso.cobo@upm.es

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo ha sido estudiar el comportamiento de vigas de hormigón, reforzadas a cortante con tejidos de fibra de carbono pegados con resinas epoxi. Para conseguir este objetivo se han planteado objetivos parciales como el análisis de la fisuración y de los movimientos en las vigas reforzadas.

La metodología empleada ha sido principalmente experimental, realizándose una serie de diez vigas de hormigón en masa o armado. Se han comparado los resultados experimentales con los teóricos, obtenidos mediante la formulación analítica existente, como la recomendada por el fib Bulletin 14. Los resultados obtenidos 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 se puede concluir que en todos los casos estudiados la rigidez prevista hasta la fisuración de las vigas es superior a la obtenida experimentalmente. Además las vigas reforzadas a cortante con tejido de fibra de carbono poseen una ductilidad superior a la de las vigas sin reforzar.

PALABRAS CLAVE: Hormigón, cortante, CFRP, refuerzo, fib Bulletin 14.

1. Introducción

La técnica del refuerzo de piezas de hormigón mediante fibras adheridas exteriormente se lleva estudiando desde hace más de treinta años [1] a pesar de lo cual no existen normas nacionales de obligado cumplimiento que regulen su diseño y ejecución. Las recomendaciones y guías de diseño elaboradas por organismos de reconocido prestigio como la Federación Internacional del Hormigón "FIB" [2] o el Instituto Americano del Hormigón "ACI" [3] son los documentos que usualmente emplean los proyectistas o las empresas que comercializan estos productos para dimensionar y ejecutar refuerzos con este tipo de materiales.

En los documentos citados anteriormente [2] y [3] se desarrollan con detalle el procedimiento de dimensionamiento a flexión, utilizando las fibras como armadura longitudinal [4], o a compresión, empleando el efecto beneficioso del confinamiento del hormigón mediante las fibras [5]. Sin embargo el refuerzo a cortante se trata de manera somera, lo que implica adoptar precauciones en su dimensionamiento y su aplicación [6].

Berset, [7] 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.

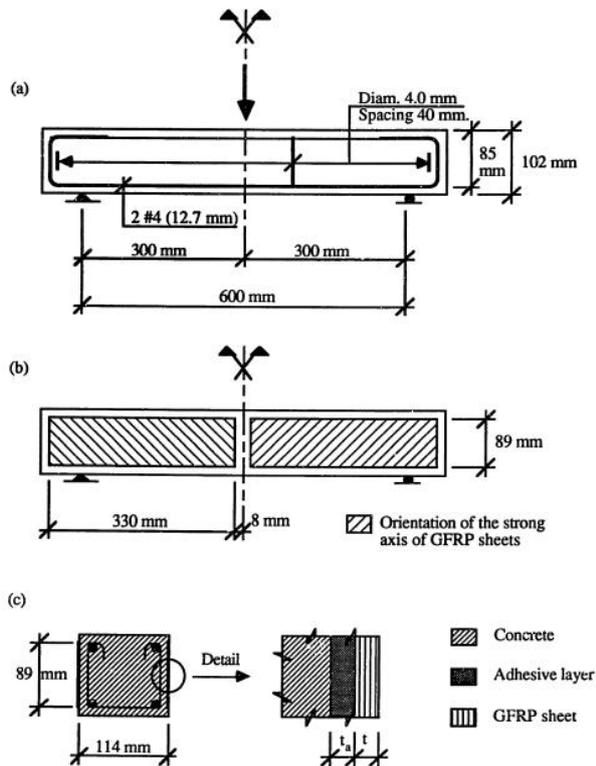


Figura 1. Geometría y disposición de barras y refuerzos en las vigas ensayadas por Berset.

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).

$$V = 0,9df_y A_s \frac{4}{L} \tag{1}$$

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

Siendo:

d el canto útil (mm)

f_y es la resistencia del acero (N/mm²)

A_s el área de la armadura de acero (mm²)

L la luz de cálculo (mm)

f'_c es la resistencia a compresión del hormigón (N/mm²)

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 (mm²)

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.

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

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).

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

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} n f_{cd} b_w 0,9d \quad (5)$$

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 pegadas exteriormente con resinas epoxi.

3. Trabajo experimental realizado

Para poder evaluar el comportamiento de las fibras y laminados de carbono como elementos de refuerzo adheridos al hormigón se ha procedido al refuerzo, mediante los citados materiales de nueve de las diez 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 de las barras corrugadas y de las láminas de carbono para refuerzo “a flexión”.

A nivel de pieza el trabajo se ha desarrollado experimentalmente ensayando a flexión, hasta la rotura, diez vigas de hormigón de 100 x 150 mm² 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.

Seis vigas se han armado longitudinalmente con dos barras de acero B500SD de diámetro 10 mm y ocho se han reforzado con laminado de carbono. Para comprobar la eficacia de los tejidos de fibra de carbono como refuerzo a cortante, se ha adherido este material como refuerzo en ocho de

las vigas anteriores, según se indica (Tabla 2). En ninguna de las diez vigas se dispuso armadura transversal de corte.

VIGA Nº	A _s	Laminado C	Tejido C
		Flexión; Ancho (mm)	Cortante; (Nº de capas)
1	2 ø 10		
2	2 ø 10	50	1
3		50	
4		100	1
5	2 ø 10	100	1
6	2 ø 10		1
7	2 ø 10	50	3
8		50	1
9		100	2
10	2 ø 10	100 y cortante	1

Tabla 2. Armaduras longitudinales y refuerzos de carbono 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 15x30 cm² 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 23,97 y 38,96 MPa.

3.1.2. Acero al carbono

Las características mecánicas del acero empleado se han obtenido ensayando seis barras a tracción procedentes del mismo lote que las empleadas en la realización de la armadura longitudinal de las vigas. Los ensayos se han realizado en una prensa Ibertest MIB 60/AM a una velocidad de 3 KN/sg. El límite elástico osciló entre 547,75 y 576,90 MPa, y la tensión de rotura entre 674,20 y 756,30 MPa.

3.1.3. Laminado de carbono

Para la realización de los refuerzos inferiores a flexión en las vigas se han empleado laminados de fibra de carbono en matriz epoxi, obtenidos mediante un proceso de pultrusión y que han sido facilitados por la empresa Drizoro, S.A. Dichos laminados, de un espesor de 1,8 mm, se han elegido con anchos de 50 y 100 mm. La resistencia a tracción es de 1.750 MPa y el módulo de elasticidad 165.000 MPa. El laminado de carbono va adherido a la superficie del hormigón mediante una capa de adhesivo con base epoxídica. Los laminados de fibra de carbono se han ensayado en la misma prensa que las armaduras de acero al carbono. Es de destacar la alta resistencia de estos laminados 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 laminado de carbono. La tensión de rotura osciló entre 1.432,40 y 1.934,30 MPa.

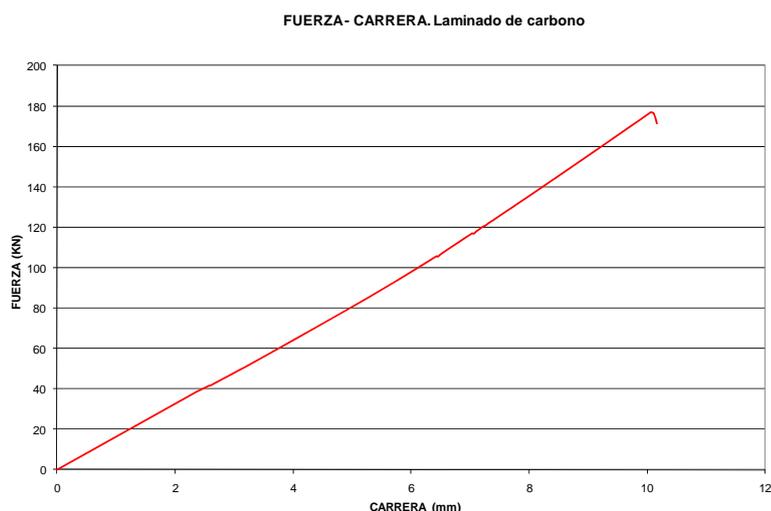


Figura 2. Gráfica fuerza-carrera de una probeta de laminado de carbono.

3.1.4. Tejido de fibra de carbono

Dicho tejido está compuesto de fibras de carbono dispuestas en una única dirección y unidas transversalmente por hilos de fibra de vidrio. Su resistencia a tracción es de 3.400 MPa y su módulo de elasticidad 230.000 MPa. Existen diversas formas de reforzar mediante tejido de fibra de carbono una estructura. La forma elegida en este trabajo es la de refuerzo completo perimetral, ya que la cara superior de las vigas se encuentra descubierta, por lo que no es necesaria ninguna operación previa para su colocación, salvo la aplicación de la resina epoxídica de adherencia.

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 laminado longitudinal de carbono en la cara inferior como el tejido de fibra colocado perimetralmente.

Para la aplicación del laminado CFRP previamente hubo que preparar la base del hormigón. Este debe estar sólido, sin partículas sueltas, y libre de suciedad, pinturas, eflorescencias, yeso, lechada superficial, grasa o desencofrante. Se preparó la superficie inferior de las vigas 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 el laminado de carbono. Tras la preparación del soporte se procedió a colocar sobre cada elemento a unir una capa de adhesivo que oscila entre 1 y 3 mm de espesor, extendiéndola mediante una espátula curvada, de manera que tenga mayor espesor en el centro que en los laterales. A continuación se coloca en su posición definitiva el laminado y se presiona hasta que el adhesivo rebose por los laterales, asegurándose de que no puedan quedar bolsas de aire ocluido. Para finalizar, se retira el adhesivo sobrante con una espátula.

Las ocho vigas que se refuerzan además mediante tejido de fibra de carbono, para soportar esfuerzo cortante, deben de seguir el siguiente proceso de ejecución: En las vigas que no dispongan de refuerzo inferior por laminado de carbono o éste no ocupe toda la superficie inferior de la viga, se deben achaflanar sus aristas, de manera que no se produzca un posible corte en el tejido. El proceso para achaflanar los vértices de la sección se realiza mediante un lijado de dichos vértices. Además es conveniente, al igual que lo indicado para el laminado de CFRP, un lijado de las superficies a las que se va a adherir la fibra.

Se procede a la aplicación de la resina epoxi, mediante rodillo, sobre el hormigón, colocando sobre la resina fresca el tejido de fibra de carbono. 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, que muestra los parámetros de cada una de las vigas construidas, se incluye la (fig.3) que se corresponde con la definición de las vigas indicada en la (Tabla 2).

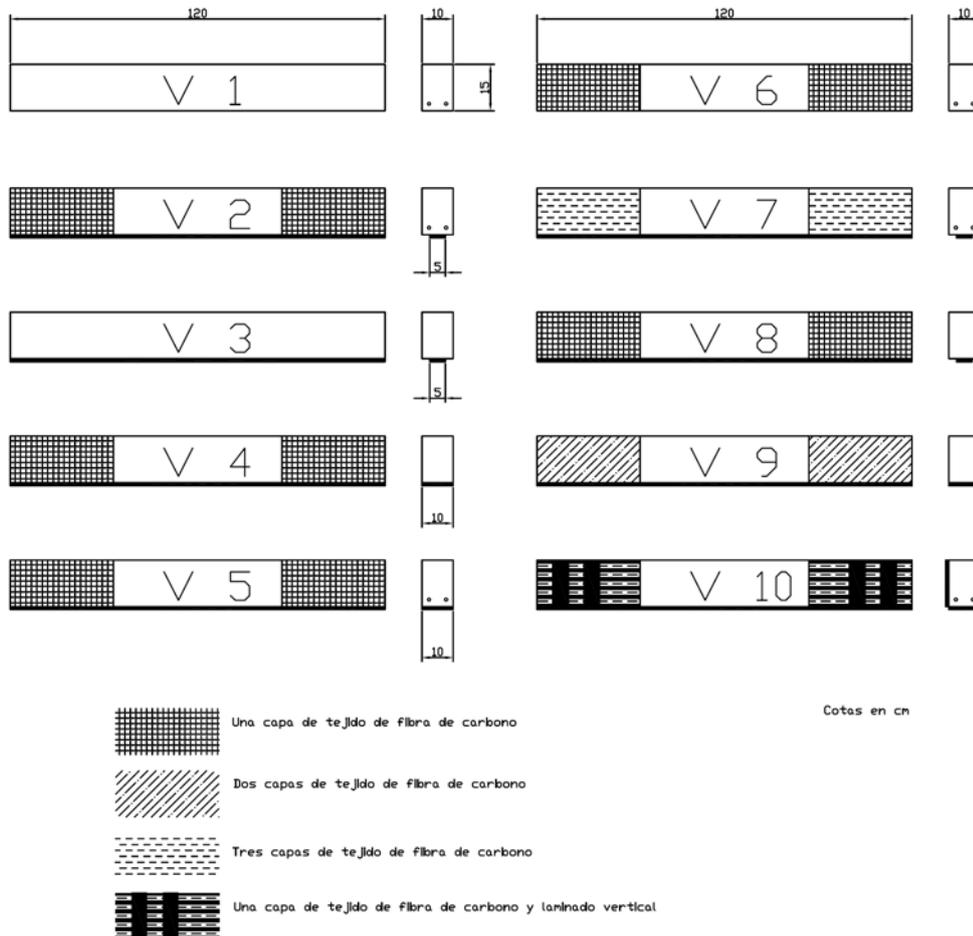


Figura 3. Definición gráfica de las vigas realizadas.

4. Resultados

Se pasa revista a continuación a los resultados obtenidos en los diez ensayos de las vigas estudiadas, dándose los datos (Tabla 3) relativos a la carga máxima, el desplazamiento a tercios para dicha carga última y la carga y desplazamiento en el momento de fisuración. Además se calcula la energía absorbida durante el ensayo como el área encerrada entre la curva fuerza-carrera y el eje de abscisas y se complementa 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)	Modo Rotura
1	45,92	4,63	11,70	0,76	279,03	Cortante
2	124,84	10,54	22,68	1,45	1.172,06	Flexión
3	33,51	3,69	14,38	0,99	63,34	Cortante
4	74,44	5,80	20,83	1,33	501,12	Cortante
5	144,02	12,75	*	*	1.642,30	Cortante
6	64,91	5,52	14,87	0,88	368,15	Flexión
7	130,57	9,55	23,36	1,22	705,74	Flexión
8	47,75	5,38	14,49	0,91	188,91	Cortante
9	115,46	9,55	*	*	1.983,53	Flexión
10	151,42	9,78	*	*	1.064,76	Flexión

Tabla 3. Resultados de los ensayos de las diez 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, calculada como el área encerrada entre la gráfica fuerza-desplazamiento y el eje de abscisas. * En estas vigas la carga y el desplazamiento de fisuración no se definen de manera clara.

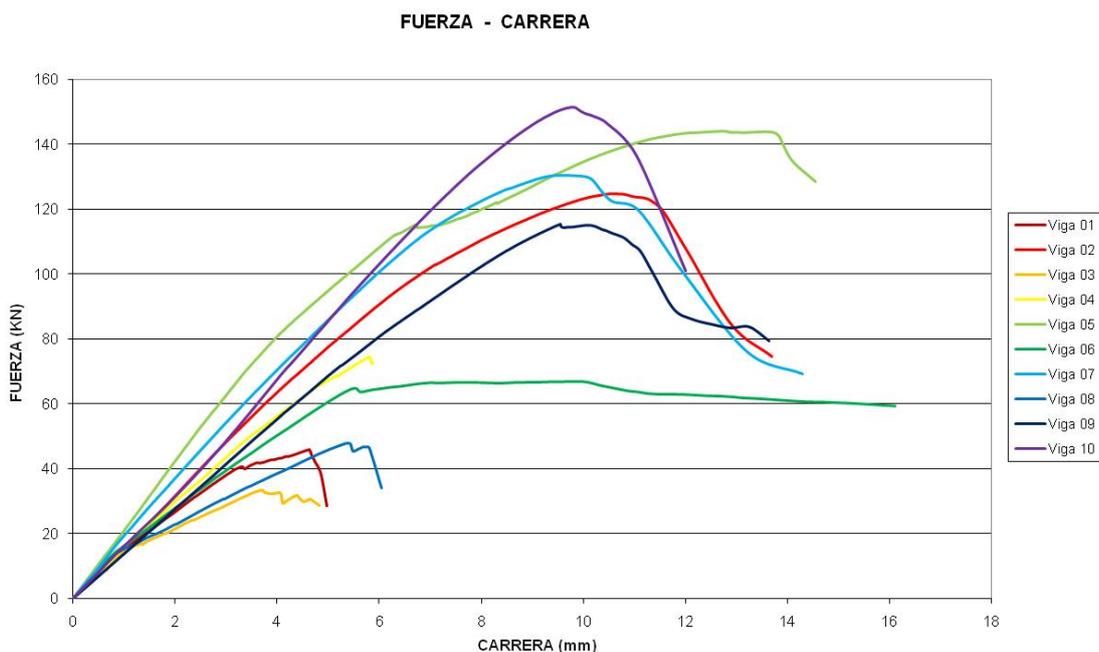


Figura 4. Gráfica fuerza-desplazamiento experimental de las vigas ensayadas.

4.1. Comparación entre los comportamientos estructurales de las vigas

Según la (tabla 3) anterior se van a comparar las vigas 1 y 3. Además se comparan las vigas 1 y 6, realizadas con la misma amasada, cuya diferencia radica en la disposición de un refuerzo de tejido de fibra de carbono a cortante. De manera análoga se comparan las vigas 2 y 7, 3 y 8, 4 y 9 y, por último, las 5 y 10, realizadas dos a dos con el mismo hormigón y cuya diferencia se encuentra en las diferentes capas de refuerzo con tejido de fibra de carbono.

4.1.1. *Comparativo entre las vigas 1 y 3*

Podría pensarse que la viga número 3 debería resistir un cortante superior al de la viga 1, debido a que la capacidad mecánica del laminado de carbono es superior al del acero y a que el canto mecánico es también superior, al estar el laminado adherido en su cara inferior. Sin embargo la comparación de ambos diagramas muestra que la viga 1 es más rígida y que su cortante último es mayor. El aumento de resistencia no se puede explicar por estar realizada la viga 3 con un hormigón más resistente (38,42 MPa frente a 32,97 MPa). La causa se podría atribuir a que el laminado posee un comportamiento distinto al acero, con un módulo de elasticidad inferior, lo que supone que para la misma carga en ambas vigas la flecha en la viga número 1 es menor a la de la viga 3, lo que supone que la fisuración por cortante aparezca más tarde. Además, el efecto pasador de la armadura en la viga 3 es prácticamente inexistente debido a la reducida rigidez del laminado frente a cargas verticales. Después de la fisuración, la rigidez de la viga 1 es mayor.

4.1.2. *Comparativo entre las vigas 1 y 6*

Mientras que la viga 1 tiene un comportamiento frágil, como corresponde a una rotura por cortante, la viga 6 posee un comportamiento significativamente más dúctil y una vez alcanzada la carga máxima, para una flecha de aproximadamente 5,5 mm, sigue desplazándose, manteniendo prácticamente el valor de la carga hasta una flecha aproximadamente tres veces superior. Hasta 40 KN se comportan igual. El refuerzo a cortante no incrementa la rigidez de la pieza.

4.1.3. *Comparativo entre las vigas 2 y 7*

El comportamiento estructural de ambas vigas es muy similar. La viga 7 es algo más rígida, posiblemente debido a la menor deformación que se produce en los dos tercios extremos que poseen un refuerzo a cortante muy superior. Sin embargo ese aumento de la resistencia a cortante no se manifiesta en la carga última que es prácticamente la misma debido a que el fallo de las dos vigas se produce por flexión y no por cortante.

4.1.4. *Comparativo entre las vigas 3 y 8*

Hasta la carga de rotura de la viga 3 el comportamiento estructural de ambas vigas coincide. A partir del punto de rotura de la viga 3 la viga 8 continúa admitiendo carga con un comportamiento muy lineal hasta que se produce la rotura. Ambas vigas fallan de forma frágil. De nuevo las rigideces son las mismas.

4.1.5. *Comparativo entre las vigas 4 y 9*

Las vigas 4 y 9 poseen un comportamiento idéntico hasta la carga de rotura de la viga 4. A partir de ese punto la viga 9 sigue admitiendo carga con la misma rigidez que en el tramo anterior hasta que se produce la rotura para una carga aproximadamente 40 KN superior. Puede comprobarse como la adición de otra capa de tejido de fibra de carbono mejora la resistencia de forma significativa.

4.1.6. *Comparativo entre las vigas 5 y 10*

Ambas vigas poseen un comportamiento bastante lineal hasta rotura, pero mientras la viga 10 muestra muy poca ductilidad la viga 5 experimenta enormes desplazamientos hasta que se produce su colapso. La viga número 5 ha roto por cortante, sin embargo la enorme deformabilidad del tejido de carbono hace que la viga siga deformándose de manera importante después de alcanzar la carga de rotura. La viga 10 posee un refuerzo a cortante superior al haberse añadido

bandas verticales de laminado de fibra de carbono, lo que hace que rompa a flexión por rotura del hormigón.

5. Conclusiones

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

En todos los casos, la rigidez prevista hasta la fisuración, obtenida analíticamente, es superior a la obtenida experimentalmente.

Las vigas sin refuerzo a cortante rompen por tracción oblicua del hormigón, siendo la grieta en la viga reforzada inferiormente con laminado de fibra de carbono más vertical que la producida en la viga armada con acero.

El efecto pasador de la armadura longitudinal es superior cuando se emplean barras de acero que cuando se pegan laminados de fibra de carbono.

Referencias

- [1] MARTÍNEZ, R. "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. 2001.
- [2] FIB BULLETIN 14 "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. 2001.
- [3] ACI 440.2R-02 "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. 2002.
- [4] MARTÍNEZ, R. "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. 1999.
- [5] AIRE, C., GETTU, R., CASAS, J.R., MARQUÉS, S., MARQUÉS, D. "Estudio Experimental y Teórico del Hormigón Confinado Lateralmente con Polímeros Reforzados con Fibras (FRP)". *Materiales de Construcción* vol. 60, 297, 19-31. 2010.
- [6] PERERA, R., VIQUE, J., ARTEAGA, A., DIEGO, A. "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. 2009.
- [7] BERSET, J.D. "Strengthening of Reinforced Concrete Beams for Shear Using FRP Composites". *Máster of science in civil engineering*. Massachusetts institute of technology. 1992.
- [8] COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN (CEN), prEN 1992-1 "Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings". 2003.