

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

<sup>1a</sup>Picazo Iranzo, A.\*; <sup>1a</sup>Cobo Escamilla, A; <sup>2</sup>González Cortina, M.  
*Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid*  
*Universidad Politécnica de Madrid*  
<sup>1</sup>*Departamento de Tecnología de la Edificación*  
<sup>a</sup>*Grupo de Investigación Patología de Estructuras, Protecciones Colectivas y Medios Auxiliares de Edificación.*  
<sup>2</sup>*Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control*  
*Avda. Juan de Herrera, 6, 28040 Madrid, España*  
*e-mail: a.picazo@upm.es*

## RESUMEN

En este trabajo se muestran los resultados experimentales obtenidos sobre vigas de hormigón reforzadas a cortante con tejidos de fibra de carbono pegados exteriormente con resinas epoxi. Durante el desarrollo del trabajo se han analizado los desplazamientos de las vigas reforzadas con CFRP (polímeros reforzados con fibras de carbono) y se ha realizado una comparación del comportamiento mecánico de los sistemas de refuerzo estudiados.

Se han realizado cuatro vigas de hormigón de 1.200 mm de longitud y sección transversal de 100 x 150 mm<sup>2</sup>. Dos vigas poseen armadura longitudinal para su trabajo a flexión mientras que las otras dos han sido reforzadas inferiormente con un laminado de fibra de carbono. Las vigas que sirven de patrón de comparación no se han reforzado a cortante, reforzando el resto con tejido de fibra de carbono. Todas las vigas se han colocado biapoyadas en la prensa, sometiénolas a dos cargas puntuales a tercios de la luz y se han ensayado a flexión hasta rotura.

Los resultados obtenidos muestran 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. En todos los casos estudiados la rigidez prevista hasta fisuración de las vigas es superior a la obtenida experimentalmente.

## 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.

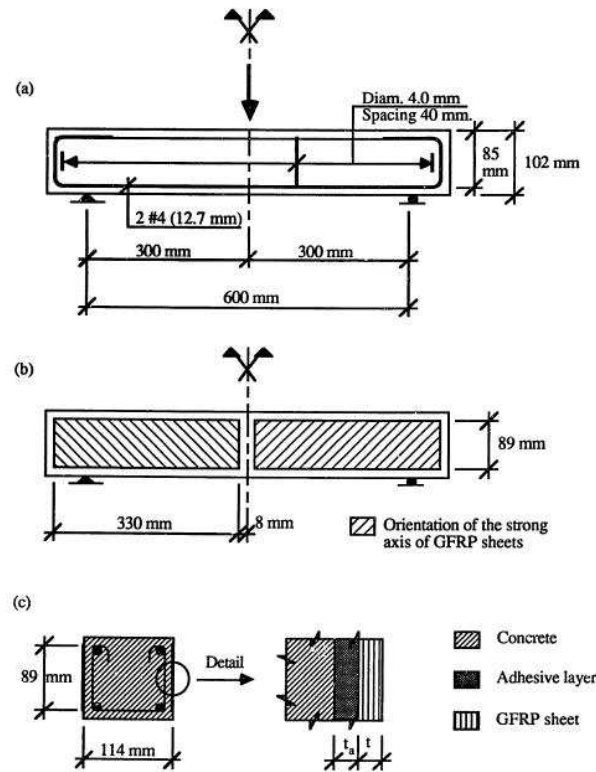


Fig.1 “Geometría y disposición de barras y refuerzos en las vigas ensayadas por Berset”.

El máximo cortante y cortante resistido por el hormigón se indica en las expresiones siguientes (ec.1 y 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<sup>2</sup>)

$A_s$  el área de la armadura de acero (mm<sup>2</sup>)

L la luz de cálculo (mm)

$f_c'$  es la resistencia a compresión del hormigón (N/mm<sup>2</sup>)

$\rho$  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<sup>2</sup>)

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.

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

Siendo:

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

$\sigma_{fc}$  es la tensión de rotura de la fibra empleada (N/mm)

t el espesor de la fibra de refuerzo (mm)

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

$\alpha$  es el ángulo de inclinación de la rotura

$\beta$  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).

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

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

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)

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

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

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

Siendo:

$\tau_{Rd}$  la resistencia de cálculo básica a cortante (Tabla 1)

$\rho_1$  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
$\tau_{Rd}$	0,18	0,22	0,26	0,30	0,34	0,37	0,41	0,44	0,48

Tabla 1 “Valores de  $\tau_{Rd}$  (N/mm<sup>2</sup>), 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

$\rho_f$  la cuantía del FRP

$b_w$  ancho de la sección

d canto útil de la pieza

$\theta$  es el ángulo de inclinación de la rotura

$\alpha$  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 tres de las cuatro 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:

- Barras y laminado de carbono.
- Pieza.

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, cuatro vigas de hormigón de 100 x 150 mm 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.

Dos vigas se han armado longitudinalmente con dos barras de acero B500SD de diámetro 10 mm. En las dos vigas restantes se ha sustituido la armadura longitudinal por un laminado de fibra de carbono pegado con resina epoxi, con una capacidad

mecánica similar a la de las dos barras de acero de 10 mm de diámetro. Para comprobar la eficacia de los tejidos de fibra de carbono como refuerzo a cortante, se ha adherido este material como refuerzo en dos de las vigas anteriores, una con armadura longitudinal de acero y otra con un laminado de fibra de carbono (Tabla 2). En ninguna de las cuatro vigas se dispuso armadura transversal de corte.

VIGA Nº	As	Laminado C Flexión	Tejido C Cortante
1	2 $\varnothing$ 10		
3		50	
6	2 $\varnothing$ 10		1
8		50	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 cm<sup>2</sup> y se han sometido a compresión. La rotura se ha realizado en una prensa Icon 250 a una velocidad de 8,8 KN/sg según la norma UNE-EN 12390-3.

Los valores medios de la tensión de rotura a compresión para cada amasada y la viga donde se ha colocado ese hormigón se indican en la tabla siguiente (Tabla 3).

AMASADA	VIGA	Res. (MPa)
3	1	32,97
	6	
4	3	38,42
	8	

Tabla 3 “Resistencia del hormigón a compresión con indicación de la viga donde se ha empleado”.

#### 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 según la norma UNE 7-474-92. Los datos obtenidos del ensayo se muestran en (Tabla 4).

PROBETA	f <sub>y</sub> (Mpa)	f <sub>s</sub> (Mpa)
1	576,90	738,20
2	565,83	739,20
3	547,75	718,70
4	552,20	733,90
5	548,13	674,20
6	550,29	756,30

Tabla 4 “Resultados de los ensayos de las barras de acero al carbono; f<sub>y</sub> es el límite elástico y f<sub>s</sub> es la tensión de rotura de la probeta”.

### 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 un ancho de 50 mm, de manera que cubren la mitad del ancho de las vigas. Los datos técnicos del laminado de carbono se reflejan en (Tabla 5). El laminado de carbono va adherido a la superficie del hormigón mediante una capa de adhesivo con base epoxídica.

<b>LAMINADO DRIZORO CFRP</b>	
Apariencia	Laminado de fibra de carbono en matriz epoxi.
Color	Negro
Resistencia a tracción (Mpa)	1.750
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,60
Contenido de fibra de carbono en volumen (%)	> 60
Módulo de elasticidad (MPa)	165.000
Espesor (mm)	1,80

Tabla 5 “Datos técnicos del laminado “Drizoro CFRP””

Los laminados de fibra de carbono se han ensayado en la misma prensa que las armaduras de acero al carbono. Para la realización de los mismos se ha procedido al corte de piezas de 500 mm de longitud y se han tomado piezas de un ancho de 50 mm, apropiado a las mordazas planas que se pueden acoplar a la prensa de ensayos, siendo el espesor del laminado de 1,80 mm. Como paso previo al ensayo es necesario complementar las probetas con unas pletinas metálicas en sus dos caras y extremos. La función de estas pletinas es impedir que las mordazas de la prensa disminuyan el espesor resistente del laminado de carbono y a su vez faciliten un buen agarre entre mordazas y probeta. Los resultados obtenidos se muestran en (Tabla 6) y se aprecian en (fig.2). Es de destacar la alta resistencia de estos laminados, algo esperable, pero es también importante citar su comportamiento frágil, esto es, rompen todas las probetas de manera explosiva. Se acompaña (fig.3) la gráfica fuerza-carrera obtenida en los ensayos de una probeta de laminado de carbono.



Fig.2 “Probeta de laminado de carbono antes y después de su ensayo”.

PROBETA	$f_s$ (Mpa)
1	1432,40
2	1587,60
3	1934,30
4	1481,20
5	1536,20
6	1775,70

Tabla 6 “Resultados obtenidos en los ensayos del laminado de carbono CFRP;  $f_s$  es la tensión de rotura de la probeta”.

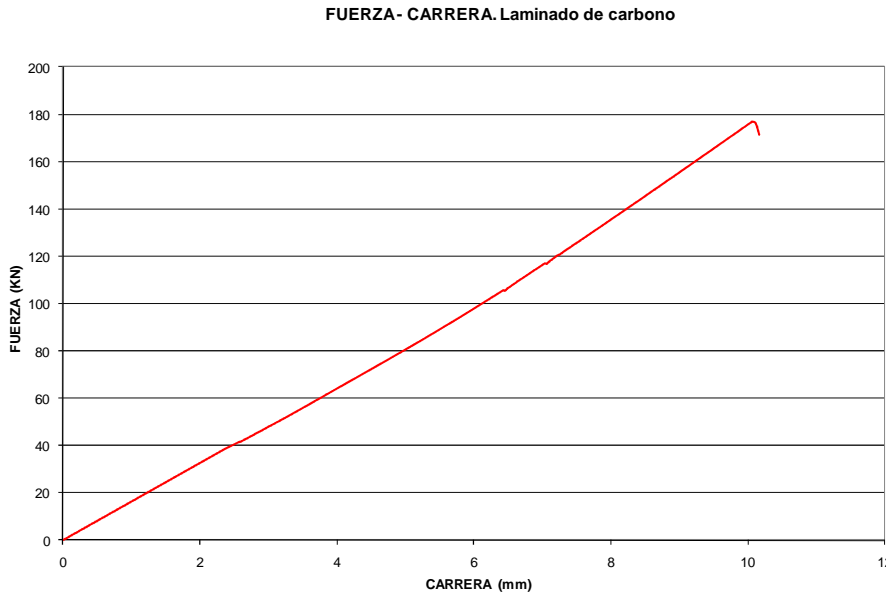


Figura 3 ”Gráfica fuerza-carrera de una probeta de laminado de carbono”.

### 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. En la (Tabla 7) se indican las características de este tejido.

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.

TEJIDO DRIZORO REPLARK	
	Fibras de carbono unidireccionales unidas transversalmente por fibra de vidrio
Apariencia	
Color	Negro
Resistencia a tracción (MPa)	3.400
Ancho (m)	0,33
Módulo de elasticidad (MPa)	230.000
Espesor (mm)	0,111

Tabla 7 “Datos técnicos del tejido de fibra de carbono “Drizoro Replark””

### 3.2.- Realización de las vigas

Para mantener la mínima separación necesaria entre las armaduras y los encofrados se dispusieron separadores circulares de plástico.

La compactación del hormigón colocado en los moldes se realizó mediante el picado con una barra de acero y el golpeo, a modo de sacudidas, del molde contra la mesa donde estaba apoyado. Posteriormente se cubrió con bayetas húmedas y se protegió con una lámina de plástico para impedir la pérdida de humedad. Pasadas veinticuatro horas se procedió al desmoldeo de las piezas y a su colocación en cámara húmeda con una temperatura de 22° y una humedad del 95 % durante veintiocho días. Pasado ese tiempo las vigas se sacaron de la cámara húmeda y permanecieron en el ambiente del Laboratorio de Materiales de Construcción de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de Madrid.

Posteriormente 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 de dicha superficie 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 oscile 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 dos vigas que se refuerzan además mediante tejido de fibra de carbono, para soportar esfuerzo cortante, deben de seguir el siguiente proceso de ejecución: Las vigas que no dispongan de refuerzo inferior por laminado de carbono o éste no ocupe toda la superficie inferior de la viga, 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 se puede apreciar en (fig.4).





Fig.4 "Detalle de la viga 8 lista para su ensayo".

Como índice gráfico de las vigas realizadas, que muestra los parámetros de cada una de las vigas construidas, se incluye en el presente documento la (fig.5) que se corresponde con la definición de las vigas indicada en la (Tabla 2).

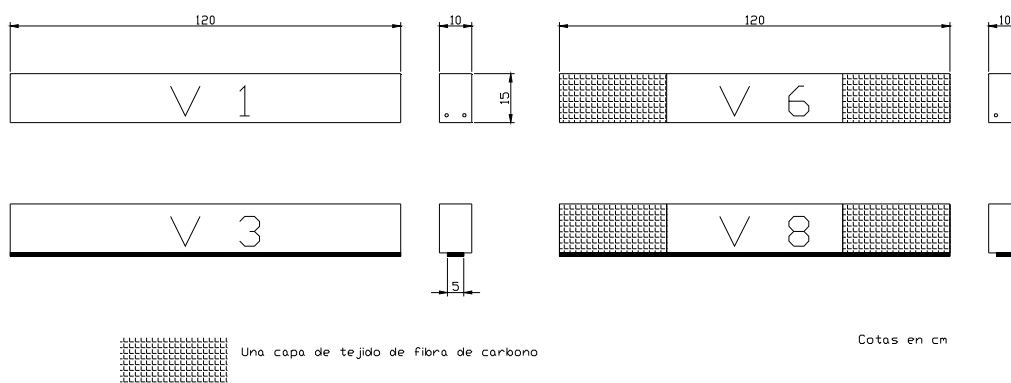


Fig.5 "Definición gráfica de las vigas realizadas".

## 4.- Resultados

### 4.1.- Valores experimentales obtenidos en las vigas

Se pasa revista a continuación a los resultados obtenidos en los cuatro ensayos de las vigas estudiadas, dándose los datos (Tabla 8) 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.6) de las cuatro vigas.

VIGA	$Q_u$ (KN)	$f$ (mm) 1/3	$Q_{fis}$ (KN)	$f_{fis}$ (mm) 1/3	E (KNm)
1	45,92	4,63	11,70	0,76	279,03
3	33,51	3,69	14,38	0,99	63,34
6	64,91	5,52	14,87	0,88	368,15
8	47,75	5,38	14,49	0,91	188,91

Tabla 8 "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 1/3,  $Q_{fis}$  la carga para el momento de fisuración,  $f_{fis}$  la flecha en el momento de fisuración a 1/3 y E la energía absorbida en el ensayo.



Fig.6 “Gráfica fuerza-desplazamiento experimental de las vigas ensayadas”.

#### 4.2.- Comparación entre los comportamientos estructurales de las vigas

Se van a comparar las vigas 1 y 3, sin refuerzo de tejido de fibra de carbono, pero una realizada con armadura de carbono y la otra con laminado de carbono. 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 3 y 8.

##### 4.2.1.- Comparativa entre las vigas 1 y 3

Las vigas 1 y 3 son las únicas que no han sido reforzadas exteriormente con tejido de fibra de carbono para aumentar su resistencia a esfuerzo cortante. La armadura longitudinal de la viga número 1 está compuesta por 2  $\varnothing$  10 de acero al carbono, en tanto que la viga 3, originalmente de hormigón en masa, se encuentra reforzada a flexión por un laminado de fibra de carbono de 50 mm de ancho. Comparando las gráficas fuerza-desplazamiento de ambas vigas (fig.6) se extraen los datos reflejados en (Tabla 9).

VIGA	Qu (KN)	f (mm) l/3	Qfis (KN)	ffis (mm) l/3	E (KNm)
1	45,92	4,63	11,70	0,76	279,03
3	33,51	3,69	14,38	0,99	63,34

Tabla 9 “Valores experimentales del análisis de las vigas 1 y 3; carga máxima de la prensa, desplazamiento máximo a l/3, carga que produce el momento de fisuración, flecha para dicha carga a l/3 y energía absorbida durante el ensayo hasta la carga de rotura”.

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. Después de la fisuración, la rigidez de la viga 1 es mayor.

#### 4.2.2.- Comparativa entre las vigas 1 y 6

Las vigas 1 y 6 están armadas con 2  $\varnothing$  10 de acero al carbono y solamente la viga número 6 dispone de una capa de refuerzo de tejido de fibra de carbono perimetral en los vanos de cortante. Comparando las gráficas fuerza-desplazamiento de ambas vigas (fig.6), se extraen los datos reflejados en (Tabla 10).

VIGA	Qu (KN)	f (mm) l/3	Qfis (KN)	ffis (mm) l/3	E (KNm)
1	45,92	4,63	11,70	0,76	279,03
6	64,91	5,52	14,87	0,88	368,15

Tabla 10 “Valores experimentales del análisis de las vigas 1 y 6; carga máxima de la prensa, desplazamiento máximo a l/3, carga que produce el momento de fisuración, flecha para dicha carga a l/3 y energía absorbida durante el ensayo hasta la carga de rotura”.

Puede comprobarse como la viga número 6 posee un comportamiento estructural completamente distinto al de la viga 1. 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.

#### 4.2.3.- Comparativa entre las vigas 3 y 8

Las vigas 3 y 8 están reforzadas inferiormente con laminado de carbono de 50 mm de ancho y solamente la viga número 8 dispone de una capa de refuerzo de tejido de fibra de carbono perimetral en los vanos de cortante. Comparando las gráficas fuerza-desplazamiento de ambas vigas (fig.6), se extraen los datos reflejados en (Tabla 11).

VIGA	Qu (KN)	f (mm) l/3	Qfis (KN)	ffis (mm) l/3	E (KNm)
3	33,51	3,69	14,38	0,99	63,34
8	47,75	5,38	14,49	0,91	188,91

Tabla 11 “Valores experimentales del análisis de las vigas 3 y 8; carga máxima de la prensa, desplazamiento máximo a l/3, carga que produce el momento de fisuración, flecha para dicha carga a l/3 y energía absorbida durante el ensayo hasta la carga de rotura”.

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.

## **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 y 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.

## **REFERENCIAS**

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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". Jornade Nuevas Técnicas de Evaluación Estructural, Rehabilitación y Refuerzo de Estructuras. Grupo español del IABSE. Madrid.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Berset, J.D. (1992) "Strengthening of reinforced concrete beams for shear using frp composites". Máster of science in civil engineering. Massachusetts institute of technology.
- [8] Comité europeo de normalización (CEN), prEN 1992-1 (2003) "eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings".

## **AGRADECIMIENTOS**

Debo expresar mi reconocimiento y gratitud a los técnicos del Laboratorio de Materiales de Construcción de la E.U.A.T.M. Sin la ayuda de D. Santiago Villa Ortega hubiese sido imposible la construcción de las probetas y la ejecución de los ensayos.

Extender mi agradecimiento a la empresa comercializadora de productos para la reparación de estructuras Drizoro, S.A. y más concretamente a D. Pedro A. Madera Arroyo.