

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

¹Álvaro Picazo; ¹Alfonso Cobo

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

Palabras Clave: *Hormigón, cortante, refuerzo, FRP*

Resumen

Tanto en estructuras de edificación como de obra civil cada día resulta más frecuente la necesidad de su refuerzo, bien por problemas asociados a patologías o por el aumento de las cargas asociado generalmente a un cambio de uso.

El objetivo principal de este trabajo ha sido estudiar el comportamiento de vigas de hormigón, reforzadas a cortante con tejidos de fibra de carbono o basalto 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 con polímeros reforzados con fibras (FRP) y la comparación del comportamiento mecánico de los sistemas de refuerzo estudiados.

Introducción

La técnica del refuerzo de piezas de hormigón mediante fibras adheridas exteriormente se lleva estudiando desde hace más de treinta años [5]. Las recomendaciones y guías de diseño elaboradas por organismos de reconocido prestigio como la Federación Internacional del Hormigón “FIB” [3] 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 [3] y [1] se desarrolla 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 [2]. Sin embargo el refuerzo a cortante se trata de manera somera, lo que implica adoptar precauciones en su dimensionamiento y su aplicación [6].

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.

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 x 120 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 (fig. 1).



Fig. 1: Detalle de una viga reforzada y ensayada hasta rotura.

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

Tabla 1: “Armado” longitudinal de carbono y refuerzos a cortante dispuestos en las vigas.

VIGANº	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	-	-

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 1).

Materiales empleados. Descripción

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 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.

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.

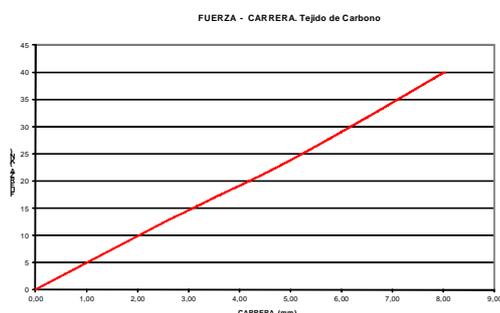


Fig.2: Gráfica fuerza-carrera de una probeta de tejido de carbono.

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.

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 1).

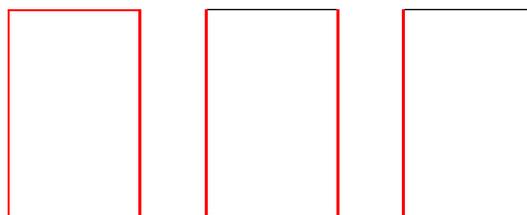


Fig.3: Definición gráfica de los refuerzos a cortante; perimetral, en “U” y lateral.

Resultados

Se pasa revista a continuación a los resultados obtenidos en los siete ensayos de las vigas estudiadas, dándose los datos (Tabla 2) y complementando dicha tabla con el gráfico fuerza-carrera (fig.4) de las vigas.

Comportamientos estructurales de las vigas

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.

Tabla 2: 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.

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

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.

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.

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.

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.

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

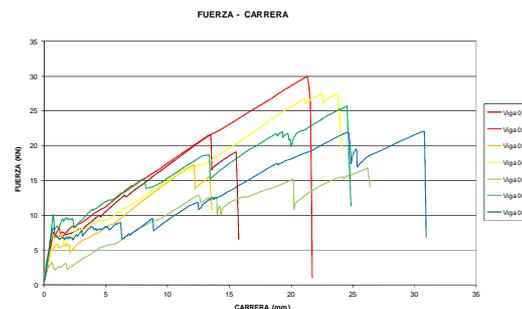


Fig.4: Gráfica fuerza-desplazamiento experimental de las vigas ensayadas.

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.

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.

Comparación entre los comportamientos estructurales de las vigas

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.

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.

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.

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.

Agradecimientos: Nuestro reconocimiento y gratitud a D. Santiago Villa, técnico del Laboratorio de Materiales de Construcción de la E.U.A.T.M. y extender este agradecimiento a la empresa comercializadora de productos para la reparación de estructuras Drizoro, S.A. y más concretamente a D. Pedro A. Madera por contribuir con la desinteresada aportación de los materiales necesarios para la elaboración de las probetas.

REFERENCIAS

- [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] 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.
- [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". *Jornada Nuevas Técnicas de Evaluación Estructural, Rehabilitación y Refuerzo de Estructuras*. Grupo español del IABSE. Madrid.
- [5] 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.
- [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.