

Estudio experimental del comportamiento de vigas de hormigón pretensado con barras y tendones de polímeros reforzados con fibras (FRP)

Experimental study of the performance of concrete beams prestressed with bars and tendons of fibre reinforced polymers (FRP)

Galo Ortiz Bernal^a, Eva Oller Ibars^b, Juan Murcia-Delso^c, y Antonio Marí Bernat^d

^a MSc en Ingeniería Estructural y de la Construcción. Universitat Politècnica de Catalunya. Estudiante de doctorado.

galo.ortiz@upc.edu

^b Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Catedrática de Universidad.

eva.oller@upc.edu

^c Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Profesor agregado. [juan.murcia-](mailto:juan.murcia-delso@upc.edu)

delso@upc.edu

^d Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de Catalunya. Catedrático de Universidad.

antonio.mari@upc.edu

RESUMEN

Con el propósito de contribuir al conocimiento sobre el comportamiento a flexión y cortante en servicio y rotura de estructuras pretensadas con tendones de polímeros reforzados con fibras (FRP), este trabajo resume los resultados obtenidos en una campaña experimental de vigas simplemente apoyadas pretensadas prefabricadas con barras o cordones de FRP. Se han ensayado un total de 19 vigas, 10 sometidas a flexión con carga puntual simétrica y 9 a cortante (18 ensayos) con carga situada a tres veces el canto útil desde uno de los apoyos de las vigas. Los parámetros en estudio fueron el tipo de material utilizado (fibra de vidrio GFRP, fibra de carbono CFRP), su formato y el nivel de pretensado.

ABSTRACT

With the aim of contributing to the understanding of flexural and shear performance under service and failure conditions in prestressed structures with fibre reinforced polymer (FRP) tendons, this study summarizes the results obtained from an experimental campaign on simply supported precast beams prestressed with FRP bars or strands. A total of 19 beams were tested: 10 in a three-point bending configuration and the remaining 9 subjected to shear (18 tests) with a point load at three times the effective depth from the one of the supports. The parameters under study were the type of material used (glass fibres GFRP, carbon fibres CFRP), its format and the level of prestressing.

PALABRAS CLAVE: Polímeros reforzados con fibras (FRP), Tendones FRP, Barras FRP, FRP pretensado, Hormigón pretensado.

KEYWORDS: Fibre reinforced polymers (FRP), FRP tendons, FRP bars, FRP prestressed, prestressed concrete.

1. Introducción

Los polímeros reforzados con fibras (FRP), y en particular los reforzados con fibras de vidrio (GFRP) han sido utilizados como armadura pasiva en situaciones específicas como pueden ser ambientes agresivos susceptibles a corrosión, en situaciones donde se requiere neutralidad electromagnética o en aplicaciones específicas como los “soft-eyes” de pantallas que serán atravesados por tuneladoras.

Sin embargo, su aplicación como armadura activa no se encuentra tan extendida, y son pocas las realizaciones existentes, así como las investigaciones relacionadas con el comportamiento a flexión y cortante de elementos pretensados con este tipo de armadura.

En [1], Rossini y Nanni presentaron una visión general de las soluciones y experiencias en el estado del arte del pretensado con barras de GFRP (polímeros reforzados con fibra de vidrio) y cordones de CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono). Los cordones de CFRP, fueron desarrollados en Japón en los años 80, y la misma tecnología se ha utilizado durante los últimos 40 años [2], y la norma ACI440.4R [3] incluye ambos materiales en su guía de diseño.

Zdanovic et al. [4] incluyeron en su estado del arte los anclajes desarrollados y las investigaciones sobre la resistencia de adherencia, ductilidad, durabilidad, comportamiento a largo plazo o altas temperaturas de los materiales disponibles.

Según [1], no existen cordones de GFRP disponibles comercialmente. Por lo tanto, se han realizado algunos estudios experimentales utilizando barras sólidas de GFRP pretensadas [5-7]. Además, existe comercialmente los cables compuestos con fibra de carbono (CFCC por sus siglas en inglés) como una alternativa al GFRP. Actualmente los tendones de CFCC, ya han sido utilizados en varios proyectos [8].

Uno de los puntos a considerar pretensar FRP es la ruptura por fluencia y la relajación. La resistencia a la ruptura por fluencia para el CFRP se establece en un 65% de su resistencia a tracción garantizada y un 40% para el GFRP [9]. Por lo tanto, la fuerza de pretensado suele estar limitada por la posible rotura por cansancio.

Küres [10] identificó la necesidad de realizar más investigaciones experimentales para evaluar las ventajas del pretensado en la resistencia al corte de vigas pretensadas con FRP. En su programa experimental, todos los especímenes fallaron por ruptura del refuerzo al corte de FRP o por fallas prematuras de deslizamiento por adherencia.

Este artículo describe un programa experimental de vigas pretensadas utilizando diferentes refuerzos activos de FRP, con el objetivo de contribuir al conocimiento existente sobre su comportamiento.

2. Campaña experimental

2.1 Descripción de la geometría

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento en servicio y rotura de elementos pretensados con tendones de polímeros reforzados con fibras (FRP), se realizó una campaña experimental de ensayos a flexión y cortante con un total de 19 vigas de sección doble T, cuya geometría se muestra en la Figura 1.

Los principales parámetros de estudio fueron el tipo de armadura activa y el nivel de pretensado.

La armadura activa consistió en dos tendones (barras o cordones) de diferentes materiales y diámetros: a) 2 barras de $\phi 12.7$ mm de polímeros reforzados con fibra de vidrio GFRP, con resina vinylester o termoplástica, b) 2 barras de $\phi 10$ mm de polímeros reforzados con fibras de carbono CFRP, ambas suministrados por Sireg, c) 2 cordones CFCC de $\phi 0,6$ " (CFRP)

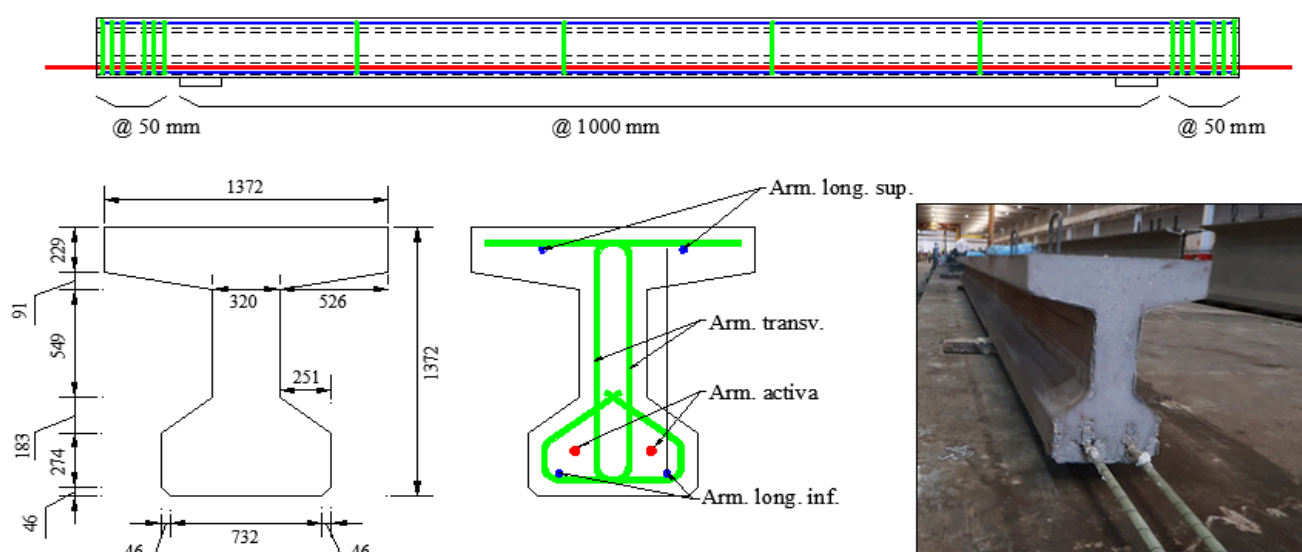


Figura 1. Geometría de las vigas de la campaña experimental.

suministrado por Tokyo Rope, y d) 2 cordones de acero Y1860 de $\phi 0.5"$. El recubrimiento vertical y horizontal fue de 50 mm para todas las armaduras activas, que se colocaron a la misma altura y simétricamente con respecto al eje vertical por el centro de gravedad de la sección.

La armadura pasiva consistió en dos barras longitudinales superiores y dos inferiores de 10 mm de diámetro de acero B500S o Glasspree FL de Sireg, de acuerdo con el material utilizado como refuerzo activo (acero o FRP). Los estribos transversales fueron de acero, y sólo se utilizaron en la zona de anclaje (6 cercos de acero $\phi 8$ a 50 mm en ambos extremos) con la forma que se muestra en la Figura 1.

La Tabla 1 muestra la matriz de ensayos incluyendo el tipo de armadura activa, la fuerza y tensión de pretensado experimental y teórica, las tensiones medias de compresión experimentales y teóricas en la sección. La nomenclatura de los ensayos corresponde a los parámetros en estudio que son: 1) punto de aplicación de la carga (ensayos de flexión de 3 puntos (B) o ensayos de cortante (S) con la carga aplicada a 3 d, siendo d el canto útil, 2) tipo de armadura activa: acero (s), CFRP (c), GFRP (g), TP-GFRP (t), CFCC (cfcc); 3) fuerza de pretensado teórica: cuatro niveles (Muy alto 320

kN (VH); Alto 250 kN (H); Intermedio 132 kN (I); Moderado 100 kN (M); Bajo 88 kN (L); Nulo 0 kN (N)). Por ejemplo, BgM se refiere a un ensayo de flexión con carga puntual con armadura activa de GFRP y un nivel medio de tensión de compresión de pretensado.

2.2 Caracterización de los materiales

Se realizaron ensayos para determinar las propiedades mecánicas de las armaduras activas y pasivas: CFRP Carbopree HS, GFRP Glasspree FL y barras TP-GFRP de Sireg, CFCC de Tokyo Rope y acero. En la Tabla 2 se muestran los valores nominales y experimentales de los principales parámetros mecánicos, incluyendo resistencia última a la tracción, deformación ultima y módulo de elasticidad, correspondientes a la armadura activa y pasiva. Las vigas fueron pretensadas y fabricadas en una planta de prefabricados (Alvipre).

La resistencia teórica a la compresión del hormigón utilizado fue de 50 o 60 N/mm², con una resistencia entre 35 y 40 N/mm² durante la transferencia del pretensado. El tamaño máximo utilizado fue de 12 mm. Se realizaron ensayos de caracterización de la resistencia a compresión, a tracción y módulo de elasticidad el día del ensayo.

Tabla 1. Matriz de ensayos de vigas con armadura pretesa de FRP.

Esp.	Armadura activa		Fuerza pretensado teórica (kN)/tensión (N/mm ²) (% f_{pu})	Fuerza pretensado exp. inicial (kN)/tensión (N/mm ²) (% f_{pu})	Fuerza pretensado exp. pre-transf. (kN)/tensión (N/mm ²) (% f_{pu})	Tensión de compresión por pretensado (N/mm ²)
<i>BcM</i>	2 ϕ 10	CFRP	100.0/637 (23%)	98.2/627 (26%)	88.4/564 (23%)	2.20
<i>BcN</i>	2 ϕ 10	CFRP	-	-	-	-
<i>BgL</i>	2 ϕ 12.7	GFRP	132.0/510 (60%)	136.2/528 (62%)	125.1/484.9 (57%)	3.05
<i>BgM</i>	2 ϕ 12.7	GFRP	100.0/395 (46%)	97.4/378 (44%)	88.8/344.2 (40%)	2.18
<i>BgL</i>	2 ϕ 12.7	GFRP	88.0/347 (40%)	87.9/341 (40%)	81.4/315.5 (37%)	1.97
<i>BgN</i>	2 ϕ 12.7	GFRP	-	-	-	-
<i>BtN</i>	2 ϕ 12.7	TP-GFRP	-	-	-	-
<i>BsH</i>	2 ϕ 0.5"	Acero	250.0/1345 (72%)	253.5/1363 (73%)	98.1/398.4 (21%)	5.68
<i>BcfccVH</i>	2 ϕ 0.6"	CFCC	320.0/1385 (55%)	324.9/1405 (55%)	228.4/987.7 (39%)	7.28
<i>BcfccH</i>	2 ϕ 0.6"	CFCC	250.0/1080 (42%)	252.4/1092 (43%)	285.1/1233.1 (48%)	5.66
<i>ScM</i>	2 ϕ 10	CFRP	100.0/637 (26%)	96.7/617 (25%)	87.4/557.6 (23%)	2.17
<i>ScN</i>	2 ϕ 10	CFRP	-	-	-	-
<i>SgM</i>	2 ϕ 12.7	GFRP	100.0/388 (46%)	100.4/389 (46%)	94.3/365.3 (43%)	2.25
<i>SgL</i>	2 ϕ 12.7	GFRP	88.0/347 (40%)	88.1/341 (40%)	80.8/313.2 (37%)	1.98
<i>SgN</i>	2 ϕ 12.7	GFRP	-	-	-	-
<i>StN</i>	2 ϕ 12.7	TP-GFRP	-	-	-	-
<i>SsM</i>	2 ϕ 0.5"	Acero	100.0/537 (29%)	103.6/557 (30%)	90.5/383.4 (21%)	2.32
<i>ScfcccVH</i>	2 ϕ 0.6"	CFCC	320.0/1385 (55%)	325.8/1409 (55%)	224.4/970.6 (38%)	7.30
<i>ScfcccH</i>	2 ϕ 0.6"	CFCC	250.0/1080 (42%)	248.8/1076 (42%)	285.3/1234 (48%)	5.60

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las armaduras activas y pasivas

Material	Tipo de armadura	Diámetro (mm)	Carga última a tracción Nom./Exp. (kN)	Deformación última Nom./Exp. (-)	Tensión última a tracción Nom./Exp. (N/mm ²)	Módulo de Elasticidad Nom./Exp. (GPa)
Acero	Tendón activo	12.9	186/190	0.0350/0.0272	1860/1859	195/204
CFCC	Tendón activo	15.2	294/141 ¹	0.0180/0.0125	2545/1634	155/159
CFRP	Barra activa	10.0	192/131 ¹	0.0180/0.0111	2450/1668	130/150
GFRP	Barra activa	12.7	96/86	0.0180/0.0139	850/664	46/49
TP-GFRP	Barra activa	12.7	96/90	0.0180/0.0130	850/696	46/54
Acero	Barra pasiva	10	43/49	0.0120/0.0220	550/628	200/200
GFRP	Barra pasiva	10	59/60	0.0160/0.0130	900/839	46/65

¹ valor máximo obtenido en el laboratorio, modo de falla: deslizamiento de la barra en la zona de mordazas.

2.3 Configuración de los ensayos e instrumentación

La configuración experimental utilizada para los ensayos de flexión y para los de cortante en vigas de hormigón con armaduras de FRP se puede observar en la Figura 2. La carga se aplicó con

control por desplazamiento utilizando un actuador pseudo-dinámico MTS, con una capacidad máxima de 1000 kN. En los ensayos a cortante, cada viga se ensayó en dos ocasiones (A, B), una vez por cada extremo con la carga aplicada a una distancia igual a tres veces la profundidad efectiva desde cada apoyo.

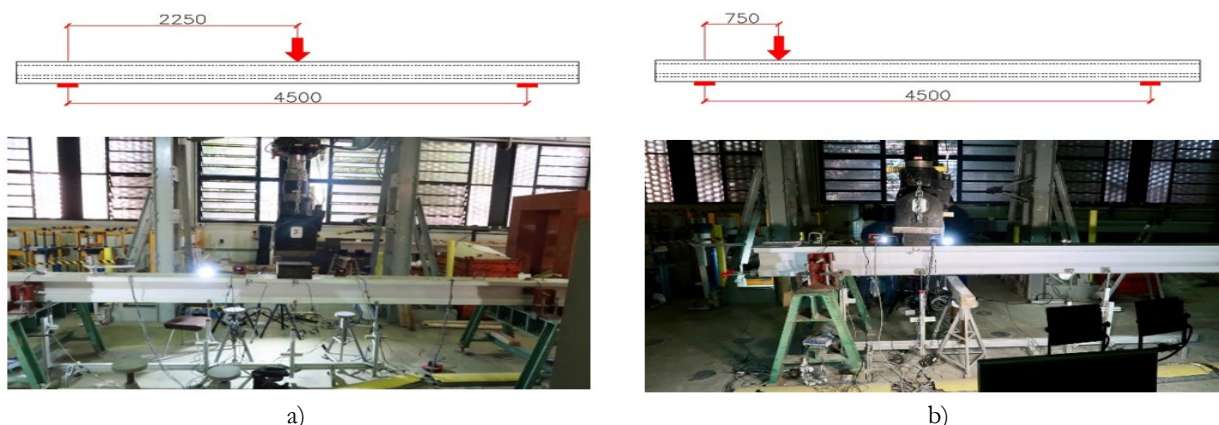


Figura 2. Configuración de los ensayos de flexión con carga puntual simétrica (a) y ensayos de cortante (b).

Durante el proceso de pretensado, se instalaron células de carga HBM C6A de 200 kN en cada extremo de los tendones para medir tanto la fuerza de pretensado inicial como sus variaciones posteriores. La instrumentación utilizada durante los ensayos incluyó galgas extensométricas, un sistema de correlación de imágenes digitales en 2D (DIC, por sus siglas en inglés) y transductores de desplazamiento.

3. Resultados de los ensayos de flexión

3.1 Carga vs desplazamiento

La Tabla 3 muestra la fuerza de pretensado previa al ensayo, la cuantía de armadura activa referenciada al módulo de elasticidad del acero, la carga de fisuración, carga última, máxima flecha, carga de servicio y ancho de fisura asociado a esa carga. La Figura 3 muestra la carga vs. desplazamiento en el punto de aplicación de carga (centro luz). Para las vigas armadas, la carga última de la BcN (con CFRP) fue mayor que la de la BgN (con GFRP), debido a la mayor rigidez de las barras, y a que el cociente $\rho \cdot E_f / E_s$ es $1.361 \cdot 10^{-3}$ para la BcN mientras que para la BgN fue de $0.791 \cdot 10^{-3}$. Sin embargo, las vigas con armadura de fibra de vidrio con resina termoestable y termoplástica, presentaron una carga última similar entre ellas.

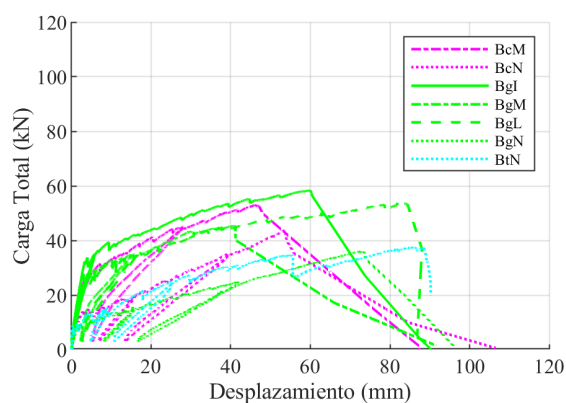
En relación a las vigas pretensadas, la carga última de la viga BgM (45.4 kN) con una fuerza teórica de pretensado de 100 kN, es ligeramente inferior que la de la viga BcM (52.9 kN), con la misma fuerza de pretensado teórica. El incremento en la carga última para las vigas pretensadas respecto las armadas es del 21% para la viga pretensada con CFRP a un nivel teórico de 100 kN ($23\% f_{pu}$) y del 117% y 142% para la viga pretensadas con GFRP a 88 kN ($40\% f_{pu}$) y 132 kN ($60\% f_{pu}$), respectivamente. En el caso de las vigas pretensadas con cordones, la que más resistió fue la BcfccVH, con el nivel de pretensado más alto ($55\% f_{pu}$). Las vigas BcfccH y BsH con un nivel similar de fuerza de pretensado pero con arbono y acero respectivamente, exhibieron comportamiento y cargas últimas similares, pero la BsH mostró mayor ductilidad. En este caso, el cociente $\rho \cdot E_f / E_s$ es similar en ambos casos.

La carga de fisuración fue muy similar para las vigas armadas BcN (10.1 kN), BgN (9.4 kN) y BtN (9.4 kN), y aumenta con el nivel de pretensado. Las vigas BgL y BgM mostraron una carga de fisuración similar (28.2 y 27.8 kN, respectivamente), y la viga BgI con un nivel de pretensado mayor presentó una carga de fisuración de 32.4 kN. Inesperadamente, la carga de fisuración de la viga BcM (24.8 kN) fue menor que la de la viga BgM (27.8 kN) con la misma fuerza de pretensado transferida.

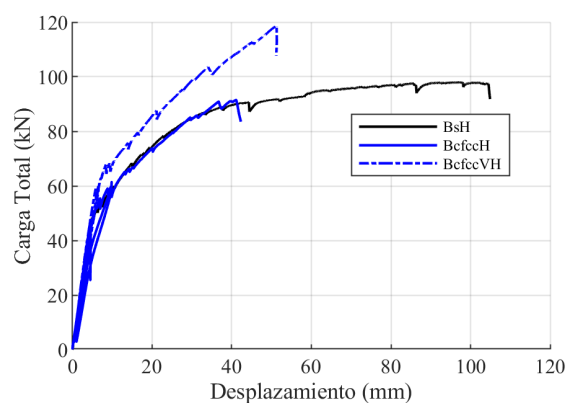
Tabla 3. Fuerza de pretensado previo ensayo, carga de fisuración, carga última y deflexión máxima a flexión.

Esp.	Fuerza de pretensado previo ensayo (kN)	$\rho \cdot E_f / E_s \cdot 10^{-3}$	Carga fisuración (kN)	Carga total última (kN)	Flecha máxima (mm)	Carga de servicio (kN)	Ancho de fisura (mm)
BcM	- ¹	1.361	24.8	52.9	47.3	36.7	0.467
BcN	0.0	1.361	10.1	43.8	54.1	18.6	- ¹
Bgl	98.5	0.791	32.4	58.4	60.4	41.4	0.735
BgM	79.3	0.791	27.8	45.4	41.3	34.2	0.569
BgL	72.8	0.791	28.2	53.8	84.4	34.3	0.494
BgN	0.0	0.791	9.4	36.0	73.8	14.2	0.749
BtN	0.0	0.791	9.4	37.6	89.5	18.9	0.770
BsH	185.5	2.600	48.3	98.0	102.3	68.3	0.359
BcfccVH	239.4	2.389	59.1	118.6	51.1	76.8	0.436
BcfccH	185.6	2.389	46.5	91.5	41.1	66.6	0.498

¹ Información no disponible de a una falla en la adquisición de datos el día del ensayo



a) Barras



b) Cordones

Figura 3. Carga total vs. desplazamiento para los ensayos de flexión a 3 puntos: a) vigas reforzadas o pretensadas con barras; b) vigas pretensadas con tendones.

Finalmente, para las vigas pretensadas con cordones, la carga de fisuración de las vigas BsH (48.3 kN) y BcfccH (46.5 kN) con el mismo nivel teórico de pretensado (250 kN) fue muy similar, y menor que BcfccVH (59.1 kN), que tiene la fuerza de pretensado teórico más alta (320 kN).

3.2 Modo de rotura

A pesar de que las vigas fueron diseñadas para fallar por flexión, todas mostraron un modo de rotura inesperado, debido a la aparición de una fisura crítica de cortante (ver Figura 4). Inicialmente, se formaron fisuras de flexión en el centro de las vigas. Sin embargo, al continuar con la aplicación de la carga, aparecieron fisuras

de cortante a ambos lados de la carga puntual, hasta la formación de una fisura crítica de cortante que se desarrolló inclinada a lo largo del alma de la viga, y se propagó horizontalmente a lo largo de la unión alma-ala y finalmente penetró en la cabeza comprimida, produciendo una rotura frágil.

Este cambio de modo de fallo de flexión a corte y la significativa reducción de la carga máxima en comparación con lo esperado, podrían estar relacionados con los efectos combinados del menor módulo de elasticidad de las barras FRP (E_f) respecto del acero y una baja cuantía de armadura de pretensado ρ , especialmente en el caso de las vigas pretensadas con barras, lo que reduce mucho la profundidad de la fibra neutra.



a) BcM



b) BcfccVH

Figura 4. Modo de fallo de las vigas ensayadas a flexión: a) BcM; c) BcfccVH.

3.3 Patrón de fisuración a través del Digital Image Correlation (DIC)

La carga de servicio se definió como la carga aplicada que corresponde a un desplazamiento vertical relativo en la sección media del vano, igual a 1/300 de la longitud del vano. La Figura 5, muestra los anchos de fisura medidos con DIC para dos de las vigas.

Los resultados indican que, para el mismo nivel de pretensado, el ancho de fisura fue mayor en la viga BgM (0.569 mm) en comparación con la viga BcM (0.467 mm). Esto se atribuye al menor módulo de elasticidad de las barras de GFRP. Por otro lado, las vigas pretensadas con tendones de CFCC presentaron anchos de fisura similares entre sí. La viga BSH, pretensada con acero al mismo nivel que la viga BcfccH, mostró un ancho de fisura un 30% menor.

4. Resultados de los ensayos de cortante

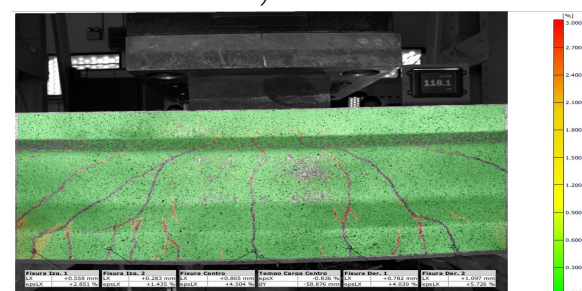
4.1 Carga vs desplazamiento

La Tabla 4 muestra la fuerza de pretensado previa al ensayo, la cuantía de armadura activa referenciada al módulo de elasticidad del acero,

la carga de fisuración, carga total última, cortante último, la máxima deflexión y el ancho de fisura crítica previa descarga. La Figura 6 muestra la carga total aplicada vs. desplazamiento en el punto de aplicación de la misma.



a) BcM



b) BcfccVH

Figura 5. Patrón de fisuración a nivel de servicio: a) BcM; b) BcfccVH.

En el caso de las vigas no pretensadas, el valor medio de la fuerza última de cortante en la viga ScM fue menor que en las vigas con armadura de fibra de vidrio (SgN y StN), a pesar de su mayor rigidez y del mayor cociente $\rho E_f/E_s$.

El valor medio del cortante último de las vigas pretensadas con GFRP (SgL y SgM) aumentó un 18 % y un 33 %, respectivamente, en comparación con la viga sin pretensar (SgN). En el caso de la viga pretensada con CFRP (ScM), el incremento medio de la fuerza última en comparación con la viga no pretensada fue mayor (97 %), en contraste con la viga equivalente de GFRP (33 %), debido al comportamiento singular de la viga ScN.

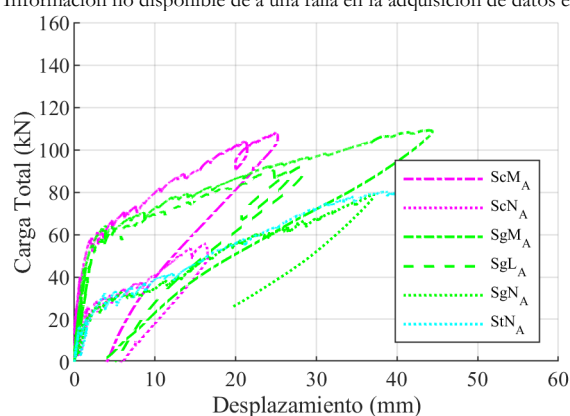
Los valores medios de los cortantes últimos para las vigas ScM (92.2 kN) y SgM (90.2 kN), con la misma fuerza teórica de pretensado

(100 kN), fueron similares. Sin embargo, la viga ScM mostró una respuesta más rígida. Ambas fuerzas últimas fueron menores que las de SsM

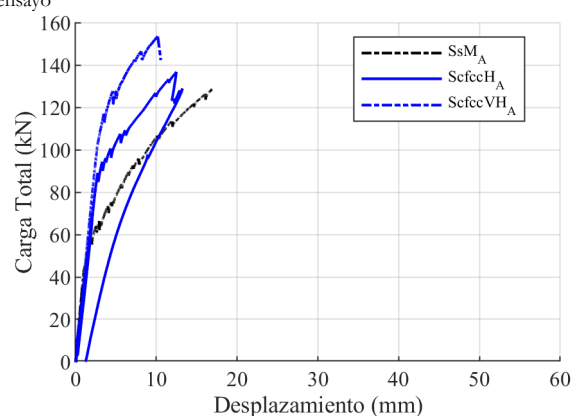
Tabla 4. Fuerza de pretensado previo ensayo, carga de fisuración, carga última y deflexión a cortante.

Esp.	Fuerza pretensado previo ensayo (kN)	$\rho \cdot E_f / E_s$ $\cdot 10^{-3}$	Carga fisuración (kN) A/B	Carga total última (kN) A/B	Cortante último (kN) A/B	Flecha máxima (mm) A/B	Ancho de fisura Crítica (mm) A/B
ScM	84.4	1.361	- ¹ /58.4	108.1/113.2	90.1/94.3	38.6/45.1	0.934/1.104
ScN	0.0	1.361	30.2/35.0	55.7/56.4	46.4/47.0	30.0/29.5	- ¹ /0.525
SgM	80.8	0.791	59.6/59.6	109.2/107.3	91.0/89.4	62.1/62.4	3.381/3.067
SgL	71.7	0.791	61.2/64.6	90.8/99.7	75.7/83.1	40.7/57.2	1.465/2.283
SgN	0.0	0.791	40.5/30.4	79.0/83.2	65.8/69.3	57.6/64.1	3.072/2.437
StN	0.0	0.791	20.1/20.5	88.4/78.1	73.7/65.1	- ¹ /55.8	1.072/3.069
SsM	85.2	2.600	104.2/85.5	128.3/115.7	106.9/96.4	27.9/24.3	0.642/0.544
ScfccVH	243.5	2.389	135.9/131.1	153.5/141.7	127.9/118.1	18.4/14.4	- ¹ /- ¹
ScfccH	192.4	2.389	118.1/105.5	136.7/115.4	113.9/96.2	21.1/13.2	- ¹ /0.578

¹ Información no disponible de a una falla en la adquisición de datos el día del ensayo



a) Barras. Ensayo "A" (izquierda)



b) Cordones. Ensayo "A" (izquierda)

Figura 6. Esfuerzo cortante vs. desplazamiento para los ensayos de cortante: a) vigas reforzadas o pretensadas con barras ensayo "A"; b) vigas pretensadas con cordones ensayo "A".

(101.7 kN), pretensada con tendones de acero al mismo nivel teórico. Las deflexiones en el fallo fueron mayores en SgM que en ScM y que en SsM debido al menor módulo de elasticidad.

La viga ScfccVH, pretensada con cordones de CFCC al nivel más alto de fuerza teórica de pretensado (320 kN), mostró un aumento medio del 17.1 % en el cortante último en comparación con la viga ScfccH. La viga ScfccVH mostró también una rigidez inicial mayor que ScfccH y SsM. El cortante último de ScfccH fue solo un 3 % mayor que la de SsM, a

pesar de que la fuerza de pretensado teórica fue significativamente más alta (250 kN vs 100 kN).

Según la Tabla 4, la fuerza última de cortante en el segundo ensayo (B) no siempre fue menor que en el primer ensayo (A).

A pesar de las diferencias en las propiedades mecánicas de las barras de GFRP y CFRP, la carga de fisuración fue bastante similar para las vigas ScM (58.4 kN) y SgM (59.6 kN). El nivel de pretensado tuvo una influencia significativa en la carga de fisuración, que fue casi tres veces mayor que en los elementos no

pretensados. En el caso de las vigas pretensadas con cordones, la carga de fisuración aumentó con el nivel de pretensado.

4.2 Modo de rotura

En relación con el modo de rotura, todas las vigas fallaron tras la aparición de una fisura crítica de cortante, como se observa en la Figura 7 para algunos especímenes. En las vigas pretensadas con acero o CFCC, la fisura crítica de cortante se abrió más cerca del apoyo. En las vigas pretensadas con barras de CFRP y GFRP, la distancia entre el apoyo y la fisura crítica de cortante disminuyó al aumentar la fuerza de pretensado. En las vigas pretensadas con barras, la rotura ocurrió cuando la fisura crítica se propagó desde la fibra inferior hacia el apoyo.

Además, la carga aplicada disminuyó bruscamente una vez que la fisura alcanzaba el cordón comprimido. En las vigas no pretensadas, aparecieron más fisuras antes de la propagación de la fisura crítica de cortante. En las vigas pretensadas con cordones, las fisuras fueron menos inclinadas y su ancho fue menor en comparación con las vigas pretensadas con barras.

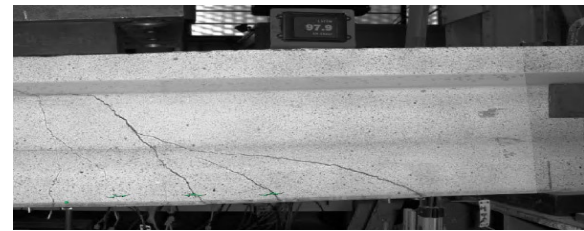
4.3 Patrón de fisuración a través del Digital Image Correlation (DIC)

La Figura 8 muestra el patrón de fisuración en la zona de cortante al momento de rotura para las vigas ScM, y ScfccH.

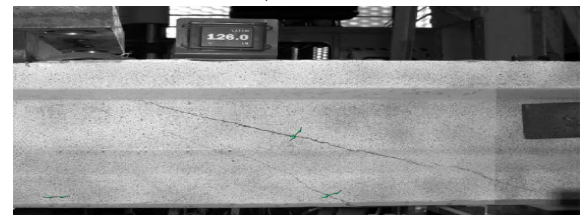
Los resultados indican que, para el mismo nivel de pretensado, el ancho medio de la fisura crítica fue mayor en la viga SgM (3.224 mm) en comparación con la viga ScM (1.019 mm) y que en la viga SsM (0.593 mm) debido al menor módulo de elasticidad de las barras de FRP.

Para las vigas pretensadas con tendones de CFCC (compuestos de fibra de carbono) la viga ScfccH presentó un ancho de fisura de 0.578

mm, valor similar al de SsM (0.593 mm), a pesar de tener un menor nivel de pretensado.

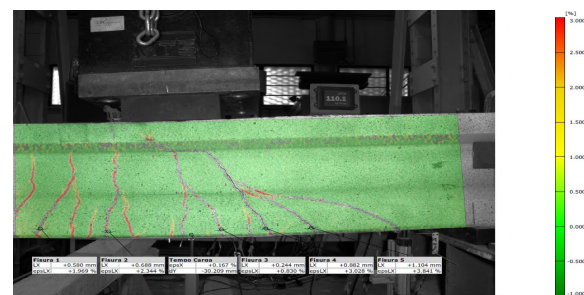


a) ScM

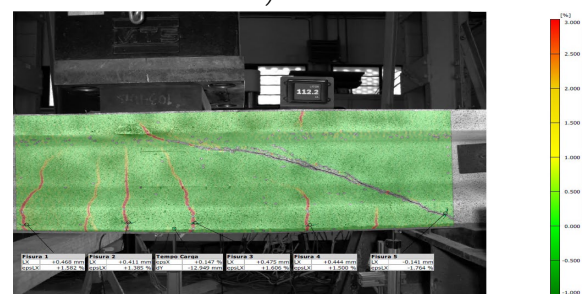


b) ScfccVH

Figura 7. Modo de fallo de las vigas ensayadas a cortante: a) ScM; c) ScfccVH.



a) ScM



b) ScfccH

Figura 8. Patrón de fisuración: a) ScM; c) ScfccH.

5. Conclusiones

Se ha desarrollado un programa experimental que incluye ensayos a flexión y cortante en vigas pretensadas con diferentes armaduras de polímeros reforzados con fibras (FRP) y varios niveles de fuerza de pretensado.

En los ensayos de flexión, todas las vigas pretensadas fallaron a cortante bajo cargas inferiores a las esperadas. Estos fallos prematuros se deben principalmente a la baja rigidez de las armaduras y al bajo nivel de pretensado. La propagación súbita de la fisura crítica y la reducción significativa de la profundidad del eje neutro son consecuencia directa de estas condiciones. Además, la presencia de fallos de adherencia local y la baja resistencia transversal de las armaduras contribuyeron al modo de fallo.

Para los ensayos a cortante en vigas pretensadas con FRP, al comparar el comportamiento de las vigas pretensadas con barra CFRP y GFRP con las vigas de referencia con armadura activa de acero, se observan capacidades resistentes similares, aunque con mayor deformación. Se observa que las vigas pretensadas con cordones CFCC tienen capacidades resistentes más altas y deflexiones significativamente menores por el mayor módulo de elasticidad comparado con las barras.

En conclusión, si bien los especímenes con armadura de FRP mostraron un prometedor comportamiento estructural, los desafíos relacionados con el tipo fallo, destacan la necesidad de profundizar en la investigación y desarrollar estrategias de diseño más precisas para mitigar estas limitaciones de manera más fiable.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI) y de los Fondos Europeos de Desarrollo Regional en los siguientes proyectos RTI2018-097314-B-C21, y PCI PCI2023-143361, y en la beca doctoral con referencia PRE2019-088919. Los autores desean agradecer a Sireg por su cortesía en el suministro de las diferentes armaduras de FRP utilizadas en los programas experimentales.

Referencias

- [1] Rossini M, Nanni A, Composite strands for prestressed concrete: State-of-the-practice and experimental investigation into mild prestressing with GFRP, *Constr Build Mater.* 205 (2019) 486–498.
- [2] Spadea S, Rossini M, Nanni A, Design analysis and experimental behavior of precast concrete double-tee girders prestressed with carbon fiber-reinforced polymer strands, *PCI J* 63, 2018.
- [3] ACI 440 American concrete Institute, ACI 440.4R-04. Prestressing concrete structures with FRP tendons, 2004.
- [4] Zdanovicz K, Kotynia R, Marx S, Prestressing concrete members with fibre-reinforced polymer reinforcement: state of research, *J Struct Concr.*, 2019.
- [5] Atutis M, Valivonis J, Atutis E, Analysis of serviceability limit state of GFRP prestressed concrete beams, *Compos Struct.* 134 (2015) 450–459.
- [6] Singh M, Long term and short term deflection of GFRP prestressed concrete slabs, University of Manitoba, 2014.
- [7] Zawam M, Soudki K, West JS, Effect of prestressing level on the time-dependent behavior of GFRP prestressed concrete beams, *J Compos Constr* 21, 2017.
- [8] Kenichi U, Tsuyoshi E, Noriaki K, Yoshiaki Y, Field deployment of carbon-fiber-reinforced polymer in bridge applications, *PCI J* 61, 2016.
- [9] Shi J, Wang X, Wu Z, Zhu Z, Creep behavior enhancement of a bastal fiber reinforced polymer tendon, *Constr Build Mater.* 94 (2015) 750–757.
- [10] Küres S, Analysis and design of concrete beams with pre-tensioned CFRP reinforcement, 2019.