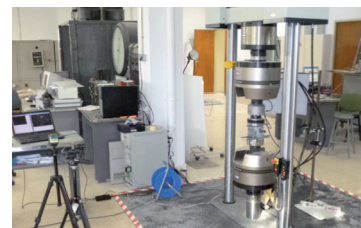


Evaluación de la resistencia a cortante de hormigones reforzados con fibras de poliolefina y acero



Assessment of shear strength of polyolefin and steel fibre reinforced concrete

■■■■
Álvaro Picazo¹, Marcos Alberti², Alejandro Enfedaque² y Jaime Gálvez²

¹ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. E.T.S. de Edificación. Departamento de Tecnología de la Edificación. Av. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid. Tfno.: +34 910 674143

² UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil y Construcción. Calle Profesor Aranguren, s/n - 28040 Madrid.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8485> | Recibido: 15/06/2017 • Evaluado: 26/06/2017 • Aceptado: 05/09/2017

ABSTRACT

- Recent research and applications have shown that fibre reinforced concrete (FRC) is an attractive solution also for structural elements [1]. The addition of fibres improves the material response when subjected to bending and tensile stresses [2]. The objective of this study was to assess the shear behaviour of steel and polyolefin fibre reinforced concrete. The experimental campaign was conducted using push-off specimens obtained from the remaining halves of specimens previously tested in flexural tensile tests. Moreover, the tests were performed with a digital image correlation system (DIC) in order to associate the cracking processes with residual shear strengths during the test. The results showed that the higher fibre dosage the higher maximum shear strengths as well as residual shear load bearing capacity.
- Keywords:** Fibre reinforced concrete, shear strength, push-off test, digital image correlation.

RESUMEN

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es un material compuesto que se ha utilizado en los últimos años para aplicaciones estructurales [1]. La adición de fibras mejora la respuesta a flexión y tracción del hormigón [2]. El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento a cortante de HRFA (acero) y HRFP (poliolefina). Se realizó una campaña experimental utilizando probetas tipo "push-off". Los ensayos fueron complementados con un sistema de video-extensometría "digital image correlation" (DIC) para asociar los procesos de fisuración con las tensiones a cortante durante el ensayo. Los resultados mostraron cómo mayores contenidos de fibras mejoraron la resistencia a cortante máxima, así como los valores de las fuerzas de cortante residual.

Palabras clave: Hormigón fibro-reforzado, esfuerzo cortante, ensayo push-off, video-extensometría.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el hormigón es uno de los materiales empleados en la construcción de infraestructuras y edificación tanto por sus ventajas económicas como por sus excelentes cualidades mecánicas [3]. En su estado primario posee una elevada resistencia a compresión con una baja capacidad a tracción (en el entorno del 10 % de su resistencia a compresión), una elevada fragilidad y

baja ductilidad [4], lo que significa que dispone de poca absorción de energía y fallas súbitas. Esto ha dado lugar a las técnicas del hormigón armado y pre o postesado y en la actualidad al desarrollo de hormigones reforzados con fibras (acero, vidrio, acrílicas, aramida, carbono, poliéster, polipropileno, poliolefina impregnada con resina, etc.).

Desde un punto de vista teórico es obligado mencionar los primeros estudios realizados en materiales con base cementicia con adiciones de fibras metálicas. Estos fueron realizados en 1963 y 1964 [5 y 6]. Desde aquel momento se ha desarrollado un gran número de investigaciones realizadas sobre hormigones con adiciones de fibras de acero, pero dicho número decrece mucho si los estudios se refieren a fibras sintéticas de poliolefina. En investigaciones previas, el uso de estas fibras ha demostrado ser una alternativa muy atractiva a las fibras de acero, con importantes resistencias residuales, mejorando la producción y siendo estables químicamente [7]. Por ello, existe un creciente interés en conocer su comportamiento mecánico, además de estar aceptadas como fibras estructurales en las normativas actualmente vigentes como la EHE-08 y el Código Modelo 2010 [8 y 9].

La inclusión de fibras en el hormigón puede tener dos finalidades, estructural o no, dependiendo de si las capacidades mecánicas que aportan las fibras se consideran en el cálculo de los elementos o no. De cualquier forma la inclusión de fibras en la masa del hormigón permite evitar la retracción por fisuración a temprana edad [10], además de mejorar el control de la fisuración endógena durante las primeras horas de puesta en obra del hormigón.

Cumpliendo ciertos requisitos, las contribuciones de las fibras pueden considerarse en el diseño estructural, pudiendo, según la EHE-08 [8], sustituir, parcial o totalmente, en algunas aplicaciones, a las barras de acero convencionales. Aplicaciones recientes han demostrado que los HRF son apropiados para elementos estructurales [7, 11 – 13]. Las fibras de acero y poliolefina son aquellas consideradas como fibras estructurales en las normas existentes [8 y 9]. Dichas normas exigen ciertos valores de resistencia residual, según el ensayo descrito por la norma EN-14651 [14], para su consideración estructural. Estos requisitos, definidos como valores de resistencia a la tracción por flexión, ya han sido estudiados [15 y 16]. Sin embargo, el diseño estructural implica también conocer la contribución a cortante de las fibras, existiendo escasa literatura sobre el comportamiento bajo esfuerzos cortantes de los HRF de acero (HRFA) y de poliolefina (HRFP).

Aunque los estudios referidos al esfuerzo cortante son amplios [17 y 18] todavía existe mucha incertidumbre en la forma de

cuantificar los mecanismos resistentes del hormigón en relación a dicho esfuerzo. Los diferentes mecanismos que se movilizan en un elemento de hormigón fisurado son: tensiones tangenciales en la zona de hormigón no fisurada (cabeza comprimida de la viga), engranamiento de los áridos (*aggregate interlock* o *crack friction*), efecto pasador de la armadura longitudinal (*dowel action*), efecto arco (*arch action*) y tensiones residuales de tracción en las fisuras (*residual tensile stress across cracks*) [19].

La tenacidad y resistencia a cortante de hormigones fibro-reforzados aumenta en relación a los hormigones de tipo convencional, pero resulta inferior a la que se consigue con ese mismo porcentaje de acero en forma de cercos de armadura convencional dispuesta a cortante. [20]. A este respecto cabe añadir que en los hormigones fibro-reforzados la abertura de fisura se ve reducida en relación a los hormigones convencionales. El enlace mediante las fibras del hormigón impide la abertura de la grieta, por lo que el efecto de engranamiento de los áridos a cortante es en todos los casos de valor superior en los hormigones con fibras.

2. OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento frente a esfuerzo cortante de hormigones reforzados con fibras de poliolefina o acero mediante una campaña de ensayos tipo "push-off" (Figura 1) con el fin de aportar criterios o datos de diseño a cortante de hormigones con fibras. El ensayo "push-off" es un ensayo de pequeñas dimensiones, bajo coste y fácil de realizar [21]. Los parámetros a determinar son la carga aplicada y la abertura de grieta bajo esa carga. Con esos dos parámetros principales se pueden obtener las tensiones promedio para una determinada abertura de fisura, lo que permite comparar entre sí las diferentes probetas. Igualmente es posible obtener la tensión de rotura y la energía de fractura. La probeta es, de forma general, un prisma en forma de "Z" con dos entallas que forman una zona de unión o ligamento en el centro de la misma, sobre la cual se aplica el esfuerzo cortante. La realización de este tipo de ensayo permite estudiar individualmente el engranamiento de los áridos en el hormigón.

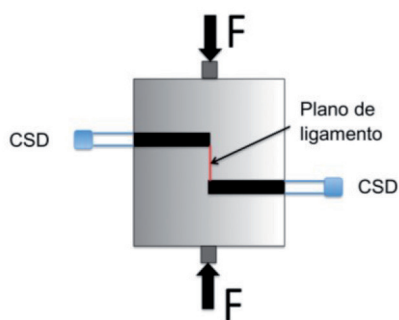


Fig. 1: Ensayo "push-off"

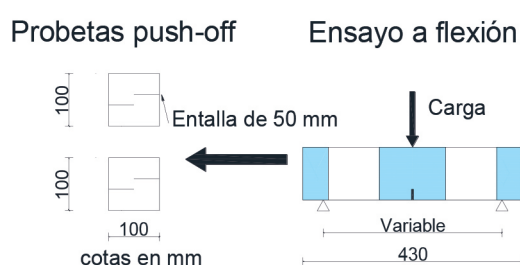


Fig. 2: Obtención de las probetas para ensayos "push-off"

Otro tema importante para estudiar de manera correcta el comportamiento de elementos estructurales sometidos a diferentes solicitaciones es conseguir medir las deformaciones que se producen. Esto nos permite conocer la relación entre las cargas aplicadas y las deformaciones, pudiendo definir las propiedades mecánicas. Para observar el comportamiento a rotura de materiales frágiles con fallas súbitas es necesario complementar los instrumentos convencionales de medida con otras técnicas que permitan generar mapas de tensiones en una determinada zona y visualizar exactamente cómo se comportan en rotura estos materiales. Una de las nuevas técnicas que permiten obtener estos resultados es la correlación digital de imágenes o video-extensometría, que genera un mapa de deformaciones de la superficie de una probeta sometida a un ensayo mecánico [22]. Es de destacar que en esta técnica no se produce contacto físico con la probeta, por lo que no se modifican las condiciones de contorno del ensayo.

El hormigón empleado en los ensayos es el mismo de una campaña experimental anterior empleado en vigas sometidas a flexión en tres puntos, conociéndose sus características generales en estado fresco y endurecido. Se emplearon probetas de hormigón sin fibras, como patrones de comparación, y otros tipos de hormigón con 10 kg/m³ de fibras de poliolefina y con 26 y 70 kg/m³ de fibras de acero.

El objetivo de la campaña experimental fue obtener información relevante respecto al instante de la fisuración y de la pérdida de la rigidez inicial de las probetas. Además, permitió obtener las curvas que muestran el comportamiento post-fisuración de los hormigones reforzados con fibras.

3. MATERIALES

Para la realización de la campaña experimental se empleó hormigón en masa y hormigón reforzado con fibras de poliolefina y acero. Las abreviaturas para notar a los hormigones se corresponden con: H0 para el hormigón sin fibras, HP para el hormigón con fibras de poliolefina y HS para los hormigones con fibras de acero. El número que acompaña a esa denominación hace referencia a los kg/m³ de fibras empleadas. Los componentes de los hormigones empleados se muestran en la Tabla 1, en tanto que sus características mecánicas se incluyen en la Tabla 2.

Respecto a las clases de fibras añadidas al hormigón, sus características se indican en la Tabla 3 (material suplementario; MS) y se muestra una imagen de una fibra de poliolefina ampliada, donde se puede apreciar el tratamiento químico superficial que mejora el anclaje fibra - matriz cementante.

4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Tras el análisis de los materiales empleados en el presente estudio experimental se pasa a describir la obtención de las probetas y la forma de realizar los ensayos "push-off".

La Figura 2 muestra la forma en que se obtuvieron las probetas de esta campaña experimental. Estas fueron obtenidas mediante mecanización a partir de las mitades resultantes de los ensayos previos de resistencia a la tracción por flexión en tres puntos con probetas entalladas de los diferentes tipos de hormigón. En la Tabla 4 se indican las probetas ensayadas de cada tipo y los valores medios de sus dimensiones, junto a los respectivos coeficientes de variación.

Para realizar ensayos se obtuvieron probetas cúbicas de 100 mm de lado, a las cuales se realizaron dos entallas de 50 mm de profundidad en sus lados opuestos. Durante los ensayos las probe-

MATERIAL	H0	HP10	HS26	HS70	HS70M
Cemento (kg/m ³)	425	375	375	425	425
Filler calizo (kg/m ³)	210	200	200	210	210
Aqua (kg/m ³)	198,9	187,5	187,5	198,9	198,9
Arena (kg/m ³)	947	918	918	947	947
Gravilla (kg/m ³)		245	245		
Grava (kg/m ³)	486	367	367	486	486
Tamaño máximo del árido (mm)	12,7	12,7	12,7	12,7	12,7
a/c	0,47	0,50	0,50	0,47	0,47
Fibras poliolefina (kg/m ³) Sikafiber 60		10			
Fibras acero (kg/m ³) Dramix RC65/35BN			26	70	35
Fibras acero (kg/m ³) Dramix RC80/50BN					35
V _f (%)		1,10	0,33	0,89	0,89
Superplastificante (%)*	1,39	1,25	1,25	1,39	1,39

* % en peso de cemento

Tabla 1: Composición de los hormigones (por m³)

ENSAYO	H0	HP10	HS26	HS70	HS70M
Módulo elasticidad (GPa)	34,22	32,10	33,70	34,58	35,31
f _{cm} , 7 días (MPa)	55,08	42,50	47,67	58,19	58,74
f _{ck} , 7 días (MPa)	39,69	30,30	34,20	41,99	42,40
f _{cm} , 28 días (MPa)	59,67	49,40	57,80	65,41	66,80
f _{ck} , 28 días (MPa)	43,09	35,50	41,70	47,34	48,37
f _{ct} (MPa)	4,69	4,78	5,32	8,38	8,60
G _r 1 mm (N/m)	730	428	570	3686	4138
G _r 5 mm (N/m)		2977	2135	19523	23810

Tabla 2: Características mecánicas de los hormigones

FIBRA	POLIOLEFINA	ACERO	
Denominación	Sikafiber /60	Dramix	Dramix
Densidad (g/cm ³)	0,91	7,85	7,85
Longitud (mm)	60	35	50
Diámetro (mm)	0,903	0,550	0,600
Esbeltez (L/D)	66	64	83
Resistencia a tracción	>500	1100	1100
Nº Fibras / Kg	27000	14500	8500

Tabla 3: Características de las fibras empleadas e imagen de una fibra de poliolefina



tas se instrumentaron mediante dos extensómetros "Crack Sliding Displacement" (CSD) que monitorizaban la abertura de las dos entallas y permitían conocer el movimiento relativo entre entallas y cualquier rotación de la probeta durante el ensayo. Además se dispuso un sistema de vídeo-extensometría que controló la superficie prevista de falla, mostrando de forma visual la aparición y desarrollo de las fisuras.

Para ensayar las probetas se contó con una máquina Instron® servocontrolada de 0,5 MN de capacidad. Para aplicar la carga de la máquina, de manera correcta, sobre las probetas se emplearon dos barras de acero de sección cuadrada de 10 mm de lado, colocadas arriba y debajo de la probeta para concentrar la carga sobre la sección vertical de falla, creando una concentración de tensiones en la superficie entre entallas. Para la correcta alineación de las probetas y las barras de carga se empleó un nivel láser que permitió centrar las dos barras de acero en el plano vertical de unión entre entallas. Los ensayos se controlaron mediante la velocidad de desplazamiento del actuador, a una velocidad de una

micra por segundo. En las Figuras 3 y 4 se muestra una probeta preparada para ser ensayada, con sus barras de carga, superior e inferior, los dos extensómetros CSD para medir los movimientos de las entallas y las cámaras de alta definición para la vídeo-extensometría de las caras anterior y posterior de la probeta.

Para una correcta medición de las deformaciones en los ensayos para conocer la relación existente entre cargas y deformaciones, con la finalidad de definir las propiedades mecánicas y parámetros de diseño de elementos estructurales se ha empleado en los ensayos un sistema de vídeo-extensometría "digital image correlation" (DIC). Este sistema consiste en relacionar, partiendo de fotogramas, el movimiento relativo de un punto a tiempo "0" y la posición del citado punto a un tiempo "t". La técnica consiste en capturar imágenes sucesivas con una cámara

digital de alta definición durante el periodo de deformación de las probetas y, a partir de estas, conocer el comportamiento de los desplazamientos del elemento estudiado mientras es sometido a incrementos de carga.

Para poder emplear esta técnica es necesario pintar sobre la probeta un patrón de puntos aleatorio en blanco y negro que usará el software de vídeo-extensometría para relacionar el mo-

vimiento relativo de los puntos y poder calcular con exactitud las deformaciones. Una buena definición del patrón consiste en una cantidad considerable de puntos negros de formas y tama-

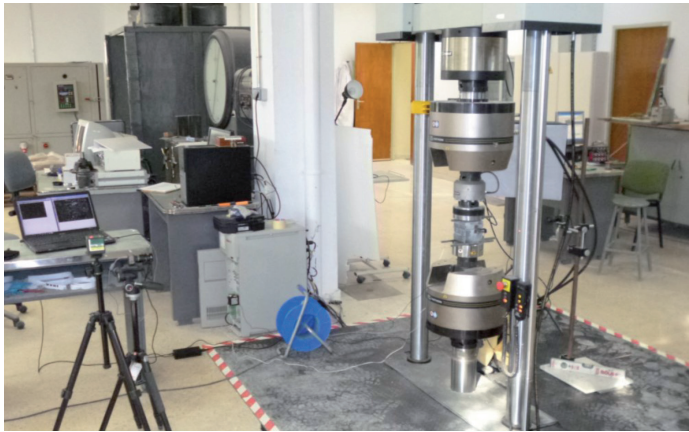


Fig. 3: Proceso general para los ensayos

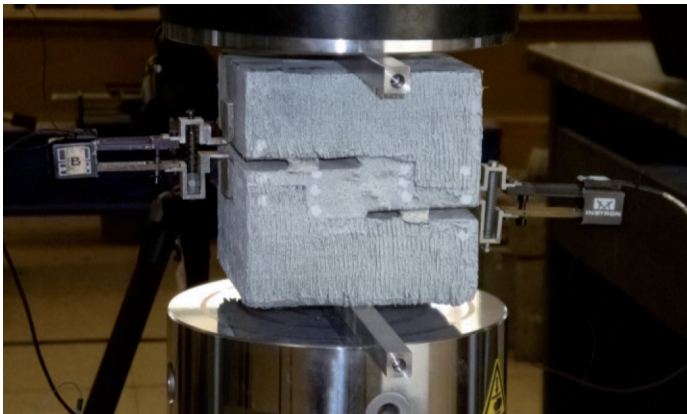


Fig. 4: Probeta preparada para el ensayo

ños variados [22], según se muestra en la Figura 5 (MS). Para la grabación de las imágenes durante los ensayos se emplearon dos cámaras de alta definición IDS UI-1480SE de cinco megapíxeles, con una resolución de 2560x1920 píxeles a una frecuencia de una imagen por segundo.

5. ENSAYOS A CORTANTE; PARÁMETROS Y PROGRAMA DE ENSAYOS

En la campaña experimental se buscó obtener la mayor información posible sobre el comportamiento a esfuerzo cortante de los HRF. Los ensayos tipo "push-off" tuvieron como finalidad caracterizar el comportamiento de una región de la probeta sometida a una sollicitación a cortante. Una premisa de partida es que la resistencia a cortante de un hormigón no reforzado depende únicamente de la resistencia de su matriz y de la fuerza del engranamiento de los áridos de la superficie de rotura, según se muestra en la Figura 6 (MS).

Los parámetros buscados, con especial trascendencia en los ensayos, fueron:

- Determinar el comportamiento post-fisuración del HRF a cortante.
- Comprobar la influencia de la dosificación de las fibras en el comportamiento post-fisuración.
- Ver la contribución de las fibras en la carga y tensión máxima de rotura.
- Determinar los diferentes modos de fallo, función de las diferentes dosificaciones.
- Determinar las deformaciones mediante la técnica de video-extensometría.
- Contar las fibras existentes en cada sección de fallo.

Para un análisis posterior, desde un punto de vista tensional, se calculó la tensión cortante promedio. Se obtuvo como resultado de dividir la carga aplicada sobre la probeta y el área de la sección resistente de la misma, según la Expresión 1, obteniéndose valores que se pueden comparar con otras geometrías de probetas tipo "push-off".

$$\tau_{prom} = \frac{F}{c \cdot d}$$
 (1)

Donde: τ_{prom} es la tensión cortante promedio.

F es la carga aplicada.
c y d son las dimensiones de la sección resistente, según la Figura 7 (MS) y Tabla 4.

Con los datos obtenidos durante los ensayos se pudieron obtener:

- Curvas carga – desplazamiento.
- Curvas tensión – deformación.
- Vídeo completo de cada ensayo, mostrando los distintos mecanismos de rotura.
- Curvas de giros y movimientos relativos de las probetas.
- Análisis de deformaciones mediante video-extensometría.

Se realizaron más ensayos de los indicados en este documento. Algunos de ellos hubo que descartarlos por fallar de manera frágil a flexión en los voladizos o por tener una excesiva sección de ligamento. Este problema fue superado mediante un refuerzo exterior de fibra de carbono que evitaba roturas no deseadas en la probeta por flexión.

En la Tabla 4 se muestran las dimensiones medias de los diferentes tipos de hormigón ensayado, en relación a las cotas de la Figura 7 (MS). En la citada Tabla se indica además el número medio de fibras existentes en la sección resistente, la media de la carga máxima del ensayo y la media de la tensión cortante máxima obtenida según la Expresión 1, antes indicada.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS A CORTANTE

Se empleó hormigón sin fibras (H0) como referencia para evaluar las mejoras en el comportamiento a cortante puro de las probetas.

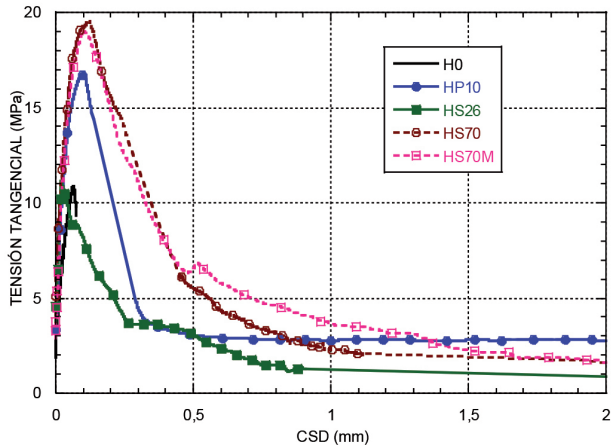


Fig. 8: Curvas tensión tangencial media – CSD (curvas medias de las probetas ensayadas de cada tipo de hormigón)

	Nº Prob.	Dimensiones (mm)				Entallas (mm)		Fibras sección	Carga máxima	Tensión tangencial máxima
		a	b	c	d	e	f			
HORMIGÓN								(uds.)	(KN)	(MPa)
H0	3	99,7 (0,01)	99,7 (0,01)	14,0 (0,56)	86,7 (0,13)	49,7 (0,01)	49,3 (0,01)		13,30 (0,76)	10,18 (0,10)
HP10	5	103,3 (0,06)	101,0 (0,01)	19,3 (0,06)	100,0 (0,01)	48,3 (0,01)	48,3 (0,02)	16 (0,15)	33,50 (0,20)	17,36 (0,19)
HS26	6	99,7 (0,01)	98,8 (0,01)	18,3 (0,04)	99,8 (0,01)	48,8 (0,02)	48,5 (0,02)	8 (0,05)	22,39 (0,32)	12,87 (0,41)
HS70	4	99,8 (0,01)	99,5 (0,01)	18,8 (0,05)	100,5 (0,01)	48,5 (0,02)	49,3 (0,02)	10 (0,46)	38,16 (0,16)	20,29 (0,17)
HS70M	4	100,3 (0,01)	100,3 (0,01)	21,0 (0,03)	100,8 (0,02)	46,3 (0,11)	49,0 (0,01)	13 (0,34)	45,63 (0,13)	21,98 (0,15)

Tabla 4: Dimensiones, carga, cortante y conteo de fibras de las probetas (valores medios de las probetas ensayadas de cada tipo de hormigón y sus coeficientes de variación)

PROBETAS	G_F (N/m)	(%) ΔG_F	Tensión tangencial a 1 mm (MPa)	Tensión tangencial a 2 mm (MPa)
H0	740			
HP10	8350	1133	2,77	2,77
HS26	4600	524	1,25	0,87
HS70	9960	1252	2,31	1,60
HS70M	11008	1394	3,68	1,64

Tabla 5: Energía de fractura (G_F) para un desplazamiento de 2 mm y variación de la misma en relación al H0, disipada en los ensayos. Tensiones residuales para desplazamientos de 1 mm y 2 mm

tas de HRF. En el caso de las probetas de H0, una vez se alcanzó su carga de rotura, el elemento se rompió de forma frágil en dos partes. En la Figura 8 se muestran las curvas tensión media-CSD de los distintos tipos de hormigón (valores medios de las probetas ensayadas) frente a sus desplazamientos durante los ensayos, donde se pueden apreciar los diferentes comportamientos del hormigón.

Las probetas fibro-reforzadas mostraron un comportamiento residual dúctil una vez superada la carga máxima. Cabe indicar que el hormigón con alto contenido de fibras de acero (70 Kg/m³), tuvo un comportamiento lineal en la rama de carga anterior al momento de fisuración, para descender en su carga desde ese momento. Como era esperable, después del pico de carga, se mantuvo una carga en el entorno del 20% de la máxima, pero con una deformación de hasta diez veces la correspondiente a la carga máxima. Las probetas de HS26 con 26 Kg/m³ de fibras de acero llegaron en algún caso a alcanzar una tensión cortante máxima de 13,60 MPa, lo que muestra un moderado aumento en relación a su hormigón de referencia (+13,33%). Las probetas reforzadas con fibras de poliolefina mostraron unos valores de tensión superiores a los del HS26, pero sin llegar a los valores de las de 70 kg/m³ de acero. Es importante destacar que a partir de 1,5 mm de desplazamiento la carga residual resulta, en todos los casos, superior en las probetas reforzadas con fibras de poliolefina.

Dentro del análisis de resultados resulta relevante incluir los datos referentes a la tenacidad de los elementos estudiados. Tras obtener las curvas tensión-desplazamiento, se calculó la energía disipada por estos hormigones integrando la citada curva. En la Tabla 5 se muestran los resultados medios de todos los tipos de hormigones ensayados. Además, también se incluyen las tensiones tangenciales que mantienen los hormigones reforzados con fibras para un desplazamiento de 1 mm y 2 mm.

7. CONCLUSIONES

- Los hormigones con alto contenido de fibras metálicas (70 kg/m³) obtuvieron las máximas tensiones tangenciales de los ensayos realizados, siempre por encima durante la descarga hasta llegar a desplazamientos tangenciales de 2 mm, donde el hormigón con fibra de poliolefina obtuvo cargas residuales superiores.
- El hormigón con alto contenido de fibras de poliolefina (10 kg/m³) presentó mayor tensión tangencial máxima que los hormigones con 26 kg/m³ de fibras de acero. Además, mostró un comportamiento post-fisuración con alta ductilidad.
- El análisis mediante vídeo-extensometría permitió analizar el proceso de fisuración de las probetas e identificar las tensiones y desplazamientos tangenciales para las que estas se produjeron. Esto permitió generar mapas de deformación y fisuración de las probetas de hormigón fibro-reforzado, siendo una tendencia generalizada que se produzca el nacimiento de la fisura en la punta de la entalla superior o inferior y se propague verticalmente hacia la otra entalla.

- La fractura en el hormigón reforzado con fibras de poliolefina se produjo de forma continua casi vertical entre los vértices de las entallas. En el caso de los hormigones con fibras de acero esta fractura se produjo con fisuras inclinadas que forman una pequeña red de fisuras. Esta red de fisuras era más amplia cuanto mayor era la cantidad de fibras.
- Las ramas de descarga de las curvas tensión tangencial - desplazamiento tangencial fueron más verticales en el caso de las fibras de poliolefina, probablemente debido a que estas fibras tienen un módulo de elasticidad bajo en comparación con las fibras metálicas. El comportamiento de los diferentes hormigones reforzados con fibras permitió ver que disipan gran cantidad de energía durante la fisuración, superando más de diez veces la energía de fractura de un hormigón sin fibras en el caso de los hormigones con fibras de poliolefina y los de 70 kg/m³ de acero.

BIBLIOGRAFÍA

[1] P. Serna, S. Arango, T. Ribeiro, a. M. Núñez and E. García-Taengua, "Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain," Materials and Structures, 42(9), p. 1233-1246, 2009.

[2] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, "Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size" Engineering Fracture Mechanics, vol. 154, pp. 225-244, 2016.

[3] E. Torroja, J.A. Torroja "Razón y ser de los tipos estructurales", Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. 1957 revisión 2007.

[4] S.C. Malatesta, "Caracterización de la fractura del hormigón y de vigas de hormigón armado", Informes de la Construcción, vol. 48, no 448, p. 60, 1997.

[5] J.P. Romualdi, G.B. Batson, "Behavior of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement". ACI. ACI Journal Proceedings (Vol. 60, No. 6), 1963.

[6] J.P. Romualdi, "Tensile Strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement". ACI Journal Proceedings, (pp. 657-672), 1964.

[7] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, L.Pinillos "Structural cast-in-place application of polyolefin fibre-reinforced concrete in a water pipeline supporting elements" Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 8(4), 05017002, 2017.

[8] EHE-08, Instrucción de hormigón estructural, Ministerio de Fomento de España, 2008.

[9] FIB Model Code, Model Code, Paris: Fédération Internationale du Béton fib/International Federation for Structural Concrete, 2010.

[10] N. Banthia, R. Gupta, "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete". Cement and Concrete Research, vol. 36, pp. 1263-1267, 2006.

[11] K. Behfarnia and A. Behravan, "Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels" Materials & Design, vol. 55, pp. 274-279, 2014.

[12] M. Di Prisco, M. Colombo and D. Dozio, "Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validation," Structural Concrete, vol. 14(4), pp. 342-361, 2013.

[13] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, V. Agrawal, "Reliability of polyolefin fibre reinforced concrete beyond laboratory sizes and construction procedures" Composite Structures, vol. 140, pp. 506-524, 2016.

[14] UNE-EN 14651, Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión. AENOR, 2007.

[15] M. G. Alberti, A. Enfedaque and J. C. Gálvez, "On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete," Construction and Building Materials, vol. Volume 55, pp. 274-288, 2014.

[16] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, "Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete" Construction and Building Materials, vol. 85, pp. 182-194, 2015.

[17] P. Barragán, "Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear". PhD thesis, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2002.

[18] E. Cuenca, "On shear behavior of structural elements made of steel fiber reinforced concrete". PhD thesis, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2012.

[19] H.P.J. Taylor, "The fundamental behaviour of reinforced concrete beams in bending and shear" ACI (Ed.), Vol SP-42, pp 43-77. Detroit. 1974.

[20] J. Turmo, "Study of the shear behaviour of fibre reinforced concrete beams", Materiales de Construcción, 58(292), 5-13, 2008.

[21] J. Echegaray, "Upgrading the push-off test to analyse the contribution of steel fiber on shear". PhD thesis, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2014.

[22] N.A. Hoult, W.A. Take, C. Lee, M. Dutton "Experimental accuracy of two dimensional strain measurements using Digital Image Correlation", Engineering Structures, vol. 46, pp. 718-726, 2013.

[23] H. Po-Chih, "In-plane strain measurement by digital image correlation", Soc. Mech. Sci. & Eng., vol. 25, nº 3, 2003.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía, Industria y Competitividad la financiación del trabajo mediante el proyecto del Plan Estatal BIA 2016-78742-C2-2-R.