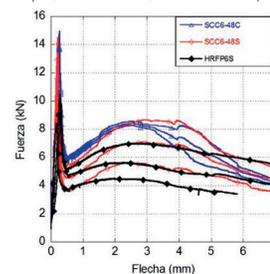


Hormigón de bajas propiedades resistentes reforzado con fibras de poliolefina: consideraciones y diseño de un hormigón estructural competitivo



Moderate-strength concrete reinforced with polyolefin fibres: considerations and design of a competitive structural concrete

Marcos Alberti¹, Alejandro Enfedaque¹, Jaime Gálvez¹, Carlos Álvarez¹ y Álvaro Picazo²

¹ Universidad Politécnica de Madrid. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción. Calle Profesor Aranguren, s/n – 28040 Madrid (España).

² Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Edificación. Departamento de Tecnología de la Edificación. Avda. Juan de Herrera, 6 – 28040 Madrid (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9584> | Recibido: 02/12/2019 • Inicio Evaluación: 03/12/2019 • Aceptado: 27/02/2020

ABSTRACT

- Polyolefin fibre reinforced concrete (PFRC) has become an attractive alternative to steel fibre reinforced concrete for structural applications. Although PFRC has shown capacity for meeting the structural requirements set in the regulations sometimes, complying with the residual strength value at 0,5mm of crack opening (f_{R1}) might be a challenge. That value is aimed at avoiding brittleness of the concrete element and in certain occasions require fibre dosages close to 6kg/m³. Most of the previous studies have been performed with normal or high quality concretes and consequently their strength at the end of the limit of proportionality (f_{LOP}) is also remarkable. Given that the residual strength at f_{R1} is set as a proportional value of f_{LOP} performing a concrete with lower mechanical properties would allow production of one that encountered fewer issues related with brittleness and offered improvement in tensile and flexural strength at a reduced cost. In this study, several concretes with reduced mechanical properties and with 6 and 7,5kg/m³ of polyolefin fibres were manufactured. Their mechanical response was analysed in order to determine if they were apt for their use in low responsibility structural concrete members. Moreover, the influence of the method used to add the fibres was studied by adding the fibres in two different ways adding them individually from sacks or using pucks (50g each one).
- **Keywords:** Polyolefin fibre reinforced concrete, regulation requirements, moderate strength concrete.

RESUMEN

El hormigón reforzado con fibras de poliolefina (HRFP) con finalidad estructural se ha convertido en una alternativa al hormigón reforzado con fibras de acero. Aunque el HRFP ha demostrado poder cumplir con los requisitos normativos, superar la resistencia residual fijada para aberturas de fisura de 0,5mm (f_{R1}) supone en muchos casos un problema. Este requisito suele exigirse para evitar la fragilidad de la pieza y conlleva en muchas ocasiones cuantías de fibras de al menos 6kg/m³. En la mayoría de los estudios publicados se utilizan hormigones de altas prestaciones, con propiedades mecánicas elevadas y que hacen que el valor de resistencia de la rama de comportamiento lineal, f_{LOP} , también lo sea. Como f_{R1} se establece como un valor proporcional de f_{LOP} la posibilidad de fabricar un hormigón de propiedades mecánicas inferiores podría suponer lograr un hormigón sin problemas de fragilidad, con importantes mejoras bajo sollicitaciones de tracción

y flexión y coste muy competitivo. En este estudio se fabricaron hormigones de bajas propiedades mecánicas y se reforzaron con 6 y 7,5kg/m³ de fibras de poliolefina estructurales. Se analizó si dichos hormigones serían aptos para su empleo en elementos de baja responsabilidad estructural que requieran cierta capacidad sometidos a esfuerzos de tracción y flexión. Además, se estudió la influencia del método de incorporación de las fibras en las propiedades mecánicas del hormigón al introducirlas sueltas y en paquetes de 50g durante el amasado.

Palabras clave: Hormigón reforzado con fibras de poliolefina, requisitos normativos, hormigón de resistencia moderada.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras (HRF) constituye hoy en día una alternativa al uso del hormigón armado [1, 2] que permite tener en cuenta la contribución de las fibras en el cálculo estructural si se cumplen ciertos condicionantes [3, 4]. A lo largo de más de 50 años se ha hecho uso del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) y por ello las normativas establecieron los requisitos a cumplir basados en éste. Sin embargo, el desarrollo de fibras plásticas con propiedades mecánicas mejoradas ha permitido obtener hormigones reforzados con fibras con carácter estructural con un menor peso de fibras y con una gran estabilidad química [5, 6]. Dentro de estas fibras plásticas, las fibras de poliolefina tienen propiedades que las hacen especialmente aptas para reforzar hormigón: baja absorción de humedad, buen comportamiento en tracción, buena resistencia a la abrasión, baja densidad y bajo coste [7]. Todo ello convierte a las fibras de poliolefina en una solución [8] que contribuye a la reducción del coste del material y a mejoras en términos de durabilidad y sostenibilidad [9].

En varias aplicaciones prácticas [10, 11] se ha podido comprobar que, a pesar de que los requisitos en las diferentes normativas fueron planteados basándose en el comportamiento de hormigones reforzados con fibras de acero, el hormigón reforzado con fibras de poliolefina puede cumplir con las exigencias normativas. En el caso de la EHE-08, ésta permite considerar la contribución de las fibras al cálculo estructural siempre y cuando se superen unos requisitos mínimos de resistencia residual a tracción por flexión en el ensayo normalizado UNE-EN 14651 [12]. La EHE-08 exige valores de resistencia residual por encima del 40% del valor alcanzado en el límite de proporcionalidad (f_{LOP}) para aberturas de fisura de 0,5mm y de, al menos un 20% para aberturas de fisura de 2,5mm (f_{R3}). Por otro lado, la norma europea de fibras para hormigón, EN

14889-2 [13], exige alcanzar un mínimo de 1,5MPa para aberturas de fisura de 0,5mm (f_{R1}), con un hormigón de referencia.

La experiencia más reciente con el uso estructural de fibras de poliolefina ha demostrado que es un material fiable y que podrían utilizarse con finalidad estructural a partir de dosificaciones de 6kg/m³ [14, 15, 16]. El requisito porcentual para f_{R3} , que se relaciona con el valor a utilizar en Estado Límite Último (ELU), se llega incluso a cumplir con dosificaciones de 3kg/m³. Sin embargo, cumplir con el requisito para pequeñas aberturas de fisura, f_{R1} , implica duplicar la cantidad de fibras. Este requisito suele estar relacionado con el diseño en Estado Límite de Servicio (ELS) y se exige para evitar la fragilidad de la pieza. La mayor parte de las aplicaciones y estudios publicados emplean hormigones de alta calidad, que incrementan la resistencia obtenida en el límite de proporcionalidad (f_{LOP}) y, al estar los requisitos fijados en f_{R1} y f_{R3} en relación a f_{LOP} , requieren aumentar la dosificación de fibras hasta los 9-10kg/m³ para poder considerar la contribución de las mismas en el cálculo estructural.

Por ello, en el presente estudio se pretende comprobar la aptitud estructural de un hormigón de propiedades mecánicas moderadas reforzado con 6 ó 7,5kg/m³ de fibras poliolefina. Se estudiará el efecto que tiene el método de adición de las fibras durante la fase de amasado introduciéndolas de dos formas diferentes: sueltas y mediante "pucks" (pequeños cilindros de fibras, con un peso aproximado de 50g). Por último, se realizará una comparación de los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura con el fin de comparar la aportación de las fibras al material.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALES Y DOSIFICACIÓN

Se utilizó un cemento UNE-EN-197-1 CEM II/B-M 32,5 N y se estableció una relación agua/cemento de 0,69. Se emplearon áridos silíceos machacados compuestos por grava gruesa y grava fina de tamaño máximo nominal de 16 y 8 mm respectivamente, según el análisis granulométrico realizado siguiendo la norma UNE-EN 933-1:1998 [17]. Se empleó árido fino silíceo. Las propiedades de las fibras usadas se pueden ver en la Tabla 1. Se eligieron fibras de 48mm de longitud por ser las más comunes en el mercado.

Se fabricaron cuatro tipos de hormigón que tuvieron como base la dosificación que se ve en la Tabla 1. A esta dosificación se añadieron 6 y 7,5kg/m³ de fibras que fueron introducidas mediante "pucks" (pequeños cilindros de fibras, con un peso aproximado de 50g) o sueltas.

En la Tabla 2 se muestra la designación de los hormigones fabricados y su resistencia a compresión media. Las mezclas se

Dosificación (kg/m ³)		Fibras de Poliolefina	
Cemento	312	Denominación	SikaFiber R-48
Agua	216	Densidad (g/cm ³)	0,91
a/c	0,69	Longitud (mm)	48
Arena	875	$\phi_{equivalente}$ (mm)	0,93
Gravilla	198	Esbeltex (L/D)	52
Grava	519	Resistencia a tracción (MPa)	> 400
Fibras	6,0/7,5	Nº fibras / kg	32895

Tabla 1. Dosificación por m³ de hormigón y propiedades de las fibras de poliolefina

amasaron durante tres minutos después de la adición de las fibras, que fueron añadidas en último lugar, lográndose una distribución uniforme de éstas, no generándose erizos ni segregaciones. En todos ellos se realizó el ensayo de asentamiento según la norma UNE-EN: 12350-2 [18], obteniéndose valores de 6-6,5cm. Aun registrándose valores de asiento que pueden calificar la

	Dosificación fibras	f_{cm} (MPa)	Edad de ensayo (días)
HRFP-7,5P	Pucks (7,5kg/m ³)	17,3 (0,01)	28
HRFP-7,5S	Sueltas (7,5kg/m ³)	20,1 (0,03)	28
HRFP-6P	Pucks (6kg/m ³)	15,0 (0,07)	21
HRFP-6S	Sueltas (6kg/m ³)	21,7 (0,04)	28

Tabla 2. Nomenclatura de los hormigones y resultados de los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas. Entre paréntesis figuran los coeficientes de variación

consistencia del hormigón como blanda hay que señalar que la adición de fibras es probable que haya reducido el asiento de la misma dosificación sin fibras.

2.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

De cada amasada se fabricaron 2 probetas cilíndricas de ϕ 150mm y 300mm de altura y 4 probetas prismáticas de 600x150x150mm³. Las probetas se dejaron en ambiente de laboratorio durante las primeras 24 horas. Posteriormente, se conservaron en cámara climática a 20°C y 98% de humedad hasta la edad de ensayo. En la Tabla 2 se presentan los resultados de resistencia a compresión obtenidos para cada una de las amasadas siguiendo el ensayo descrito en UNE-EN: 12390-3 [19].

El comportamiento se midió mediante ensayos de fractura a tracción por flexión en tres puntos realizados siguiendo la norma UNE-EN 14651 [12]. Ésta es la referida por la EHE-08 [4] para evaluar la aptitud estructural de hormigones reforzados con fibras.

En el caso de las amasadas HRFP-7,5, se hicieron todos los ensayos a los 28 días. No se detectaron diferencias notables entre las propiedades de los hormigones con adición de fibras sueltas y aquellos con adición de fibras en "pucks". En cuanto a las amasadas de HRFP-6, una vez conocida la ausencia de diferencias entre las formulaciones tipo P y S, se realizaron los ensayos de compresión y tres ensayos de resistencia a la flexión por tracción a 21 días y uno a 28 días, para estudiar el efecto de un desencofrado prematuro. Esta modificación permitió evaluar las propiedades del hormigón fabricado siguiendo métodos de baja tecnificación.

Las probetas se entallaron con una sierra circular equipada con un disco de corte de 3mm de espesor refrigerado con agua. Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos Instron 8803 con una capacidad de carga de 500kN. Los ensayos se controlaron con la abertura de los labios de la fisura (CMOD) hasta una abertura superior a 5mm. La flecha se midió mediante dos transductores diferenciales de variación lineal (LVDT) colocados a la altura de la entalla a cada lado de la probeta.

3. RESULTADOS

Se puede ver que las formulaciones a los 28 días de edad tienen una resistencia media a compresión de alrededor de 20MPa mientras que a 21 días solo alcanzan 15MPa.

En la Figura 1 pueden verse las curvas fuerza-CMOD obtenidas en los ensayos de fractura. La aportación de las fibras en los procesos post-fisuración de la matriz permitió al material alcanzar deformaciones elevadas sin producirse el colapso de la probeta.

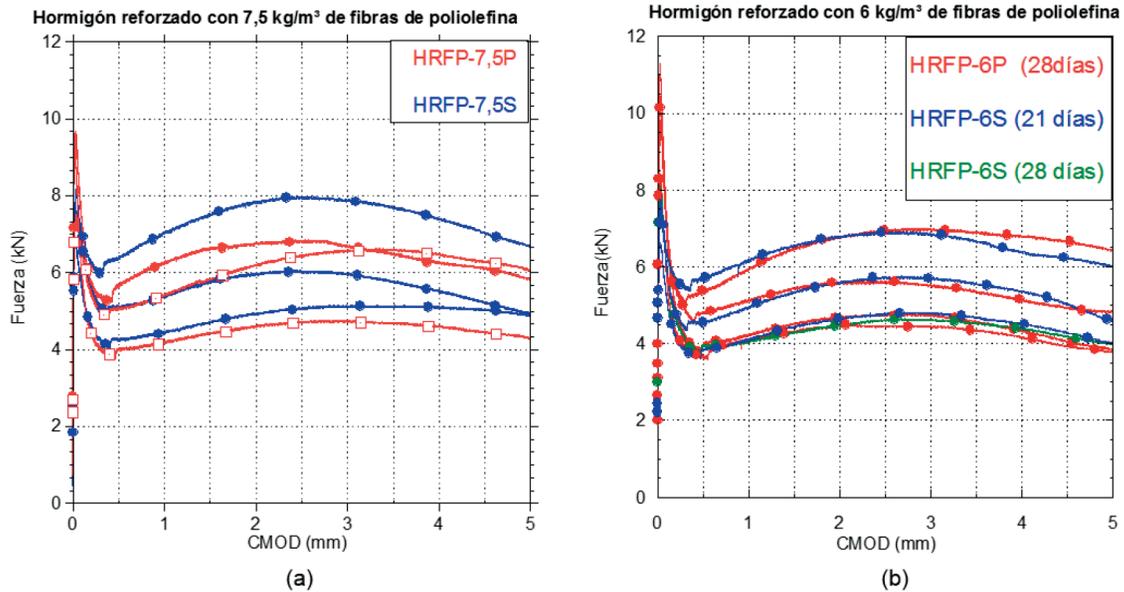


Figura 1. Curvas fuerza - CMOD de los ensayos de resistencia a la flexión por tracción UNE-EN: 14651 [12]

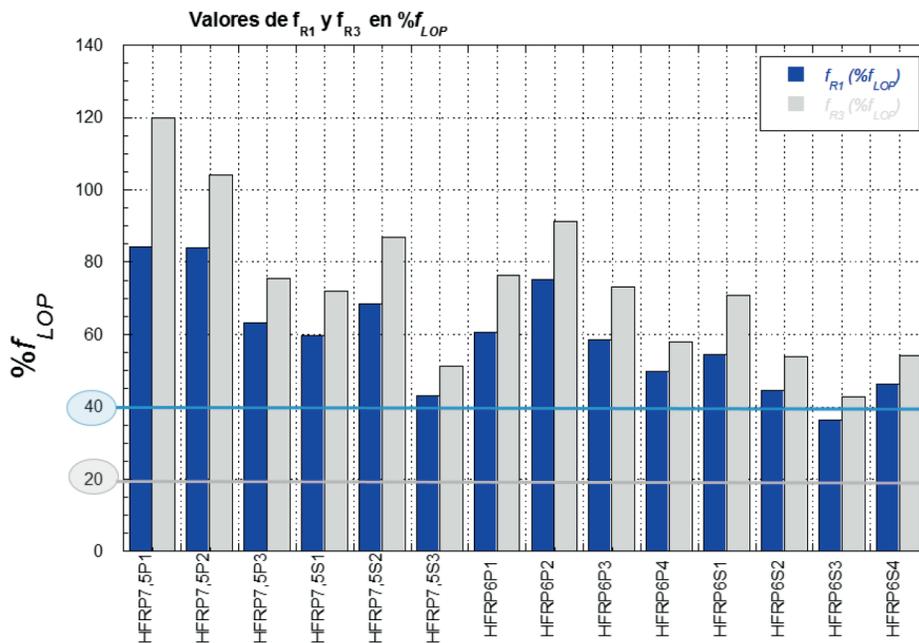


Figura 2. Comparativa de resultados de f_{R1} y f_{R3} en % de f_{LOP} para cada probeta y comprobación del cumplimiento de la EHE-08 [4]

La dispersión obtenida está dentro de los márgenes habituales en este tipo de hormigones, siendo los resultados comparables en ambas formulaciones. En la Figura 1(b) se ve que a 21 días los resultados obtenidos son superiores a los obtenidos a 28 días en el caso de la formulación HRFP-6S. No obstante, hay que resaltar que solo hay un resultado a 28 días de esta formulación por lo que la

comparación no es estadísticamente fiable.

Para poder analizar los resultados se obtuvieron los valores medios y su dispersión basándose en los comportamientos en fractura habituales encontrados en la literatura [5, 20], es decir, analizando la curva Fuerza-CMOD completa. Se obtuvieron los valores de resistencia residual mediante la expresión (1) establecida en [12].

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (1)$$

En la Tabla 3 se observa cómo los valores de las resistencias residuales, en especial f_{R1} y f_{R3} , se ven influidos por la cuantía de fibras. Así, f_{R1} está en el entorno de 1,5MPa con 6 kg/m³ de fibras y 1,8MPa con 7,5kg/m³. Por lo tanto, las formulaciones podrían considerarse estructurales según [4,

13].

Todos los valores de f_{R3} son superiores a los de f_{R1} . Con 7,5kg/m³ f_{R3} está alrededor de 2MPa, mientras que con 6kg/m³ está cerca de 1,8MPa. En las formulaciones donde se utilizaron "pucks" se obtuvieron valores de resistencias residuales mayores y con menor dispersión. Así pues, se puede considerar un método de adición

	HRFP-6P (21 días)	HRFP-6P (28 días)*	HRFP-6S	HRFP-7,5P	HRFP-7,5S
f_{LOP} (MPa)	2,3 (0,08)	2,6 (---)	3,2 (0,12)	2,4 (0,08)	2,8 (0,13)
f_{R1} (MPa)	1,5 (0,20)	1,3 (---)	1,4 (0,17)	1,8 (0,23)	1,6 (0,18)
% f_{LOP}	64,8	49,8	45,5	77,1	57,0
f_{R3} (MPa)	1,9 (0,18)	1,5 (---)	1,7 (0,20)	2,4 (0,30)	1,9 (0,19)
% f_{LOP}	80,2	58,0	54,0	99,4	70,0

Tabla 3. Valores medios de resistencia residual obtenidos y coeficiente de variación

*Valores obtenidos con una sola probeta

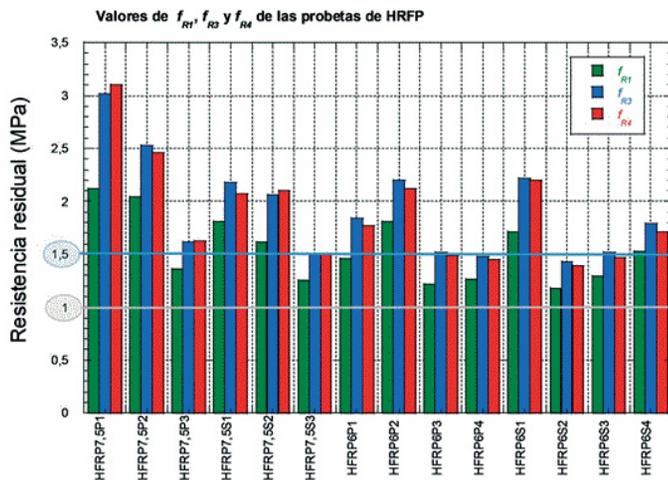


Fig. 3: Comparativa de resultados de f_{R1} , f_{R3} y f_{R4} para cada probeta y comprobación del cumplimiento de la EN 14889-2 [13]

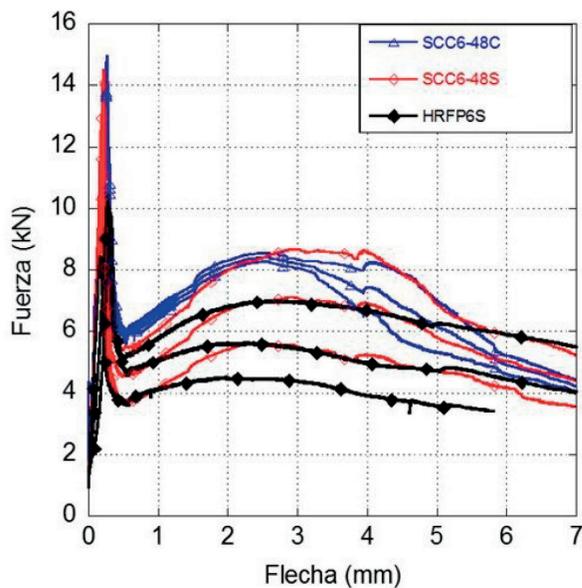


Figura 4. Curvas fuerza-CMOD de HRFP6S del presente trabajo y de SCC6-48 de la referencia [15]

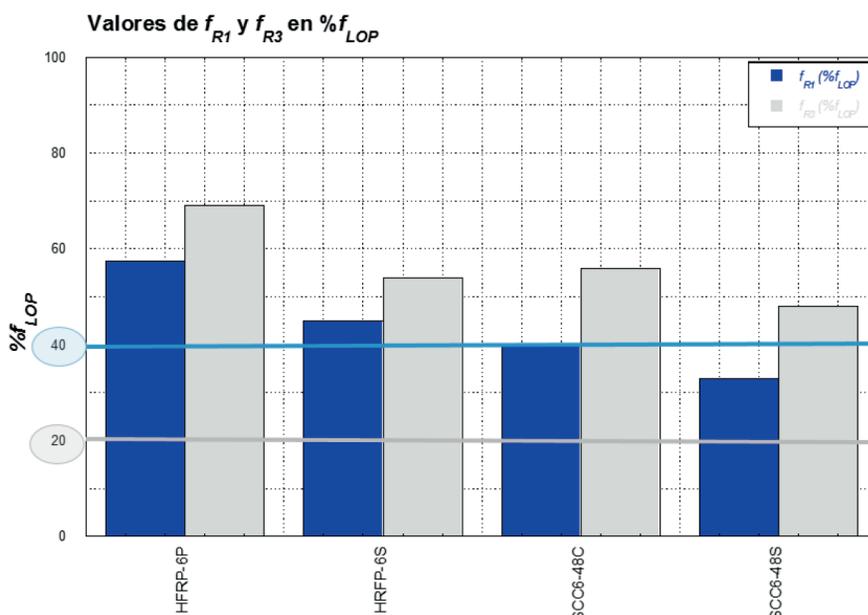


Figura 5. Resultados de f_{R1} y f_{R3} en % de f_{LOP} y comprobación del cumplimiento de los requisitos de la EHE-08 [4] para amasadas con dosificación de fibras de 6kg/m³

adecuado. No hay tendencia clara en los valores de f_{LOP} obtenidos. Todos los hormigones cumplen que el valor en f_{R1} es superior al 40% de f_{LOP} y al 20% de f_{LOP} en f_{R3} por lo que se puede tener en cuenta la contribución de las fibras en el cálculo estructural según [4].

4. DISCUSIÓN

Como se puede observar en la Figura 2, todas las probetas, excepto la HRFP6S3, superaron los requisitos establecidos en [4] para considerar la contribución de las fibras en el cálculo estructural. Además, se cumple holgadamente el requerimiento del 20% de f_{LOP} en f_{R3} . En el caso de la probeta HRFP6S3 que no cumplió en f_{R1} es probable que se debiese a un menor número de fibras en el tercio de la superficie de fractura más cercano a la punta de entalla como ya se ha mostrado en estudios anteriores [15].

La norma EN 14889-2 requiere al fabricante la cuantía de fibras que permite superar 1,5MPa para f_{R1} y 1,0MPa para f_{R3} usando un hormigón de referencia. En la Figura 3, se puede observar que para estos hormigones es más restrictivo utilizar este criterio que lo solicitado por [4]. Los valores de f_{R3} como era esperable, superaron 1MPa en todas las probetas, mostrando la excelente aptitud de las fibras de poliolefina como refuerzo con deformaciones importantes. Se puede apreciar en la Figura 3 que los valores de resistencia residual para aberturas de fisura de 3,5mm (f_{R4}) permanecen en valores muy similares. Cabe destacar que en otras investigaciones [20, 15], se observó que en general f_{R4} fue incluso superior si bien las fibras usadas eran de mayor longitud (60mm).

Se realizó un análisis de la influencia de la matriz utilizando datos de la literatura en los que se usaron hormigones de mayores propiedades mecánicas, el mismo tipo de fibras y la misma dosificación. Este aspecto es importante ya que las propiedades aportadas por las fibras dependen del anclaje fibra-matriz y por tanto de características de esta. En la referencia [15] se estudió el comportamiento de un hormigón autocompactante con 6kg/m³ de las mismas fibras utilizadas en este estudio. Dicho hormigón, denominado SCC6-48 tiene importantes diferencias: se usa superplastificante, un mayor contenido de cemento y filler calizo. La relación agua/cemento fue 0,5. La resistencia a compresión media, f_{cm} , a 28 días del hormigón fue 48,5MPa ($f_{ck}=34,8$ MPa).

En la Figura 4, se han comparado las gráficas obtenidas en los ensayos de resistencia a la tracción por flexión de las probetas HRFP6S con las de la referencia [15].

Analizando las curvas de la Figura 4, se puede ver que, las ramas residuales son semejantes para los puntos característicos de las curvas de fractura de los materiales analizados. Las propiedades del hormigón afectan fundamentalmente a la resistencia f_{LOP} como se puede ver en la citada figura. Por el contrario, los valores de la resistencia mínima de la rama de descarga son similares para todas las formulaciones. En el caso de los valores de la resistencia máxima registrada después de la caída de carga se puede ver que las formulaciones SCC6-48 muestran un mayor valor medio que la correspondiente al hormigón pobre con un contenido igual de fibras. Por lo tanto,

parece que para estados de deformación elevados tiene una mayor importancia la capacidad resistente de la matriz.

Comparando los valores de f_{LOP} , f_{R1} y f_{R3} de este trabajo con los de la referencia [15] se observa que los valores de f_{R1} son mayores en los hormigones SCC6-48, lo cual podemos justificar con el uso de hormigón autocompactante cuyo flujo tiende a mejorar la orientación de las fibras [20]. También puede comprobarse como f_{LOP} es el valor en el que se producen mayores diferencias entre las formulaciones. Esto se considera lógico puesto que dicho valor está directamente relacionado con la resistencia de la matriz a tracción.

Para analizar la importancia que cobra el valor de f_{LOP} en la Figura 5 se han incluido los valores porcentuales de f_{R1} y f_{R3} respecto a f_{LOP} . El hormigón de este estudio cumple los requisitos de la norma con mayor margen que el del artículo [15]. Esto es debido a que, a pesar de tener valores de f_{R1} y f_{R3} similares debido a la misma dosificación de fibras, el valor de f_{LOP} es mayor en las amasadas de [15]. Por tanto, el hormigón que se ha realizado en este estudio cumple los requisitos estructurales, aprovechando eficientemente cada material, sin problemas de fragilidad en aberturas de fisura iniciales.

5. CONCLUSIONES

Se ha fabricado un hormigón de propiedades mecánicas moderadas reforzado con fibras de poliolefina que cumple los requisitos establecidos en las normas para tener en cuenta la contribución de las fibras en el cálculo estructural.

Este hormigón es un material con elevada ductilidad y resistencia residual que muestra una caída de carga limitada tras la fisuración de la matriz.

Los resultados obtenidos permiten considerar el uso de las fibras plásticas como refuerzo en la construcción de elementos que requieran notables resistencias post-fisuración y que no estén sometidos a compresiones elevadas.

La comparación de los resultados de este estudio con los obtenidos en hormigones con propiedades mecánicas superiores e igual dosificación del mismo tipo de fibras [15] permitió obtener las siguientes conclusiones:

- Las resistencias residuales para las aberturas de fisura iniciales, f_{R1} , fueron similares, aunque la caída de los valores de la resistencia en f_{LOP} permite fabricar un hormigón pobre con menores problemas de fragilidad y cumplir los requisitos estructurales con dosificaciones de fibras más bajas.
- Las resistencias residuales para las aberturas f_{R3} cumplieron los requisitos estructurales, demostrando la excelente contribución de estas fibras al comportamiento del hormigón con importantes deformaciones de tracción.
- Las resistencias residuales para las aberturas de fisura f_{R3} decrecieron con el empeoramiento de la matriz.
- Los valores de f_{R3} y f_{R4} de los hormigones de menor resistencia resultaron muy semejantes, siendo f_{R4} ligeramente inferior. Esto contrasta con los resultados obtenidos con matrices de mayor calidad.

REFERENCIAS

[1] P. Serna, S. Arango, T. Ribeiro, a. M. Núñez and E. Garcia-Taengua, "Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain," *Materials and Structures*, 42(9), p. 1233-1246, 2009. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9540-9>

[2] J. A. Lopez, P. Serna, E. Camacho, H. Coll y J. Navarro-Gregori,

«First Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Footbridge in Spain: Design and Construction.», *Structural Engineering International*, vol. 24(1), pp. 101-104, 2014. <https://doi.org/10.2749/101686614X13830788505793>

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

[4] EHE-08, Spanish Structural Concrete Code, Spanish Minister of Public Works, 2008.

[5] 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.024>

[6] P. Pujadas, A. Blanco, S. Cavalero y A. Aguado, «Plastic fibres as the only reinforcement for flat suspended slabs: Experimental investigation and numerical simulation,» *Construction and Building Materials*, vol. 57, pp. 92-104, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.082>

[7] J.E. McIntyre, Synthetic fibres: nylon, polyester, acrylic, polyolefin, Elsevier, 2004. <https://doi.org/10.1201/9780203501702>

[8] S. Yin, Tuladhar, S. F. R., M. Combe, T. Collister y N. Sivakugan, «Use of macro plastic fibres in concrete: A review,» *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 180-188, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.105>

[9] S. Yin, T.R., M. Sheehan, M. Combe y T. Collister, «A lifecycle assessment of recycled polypropylene fibre in concrete footpaths,» *Journal of Cleaner Production*, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.073>

[10] 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.075>

[11] A. M. Alani and D. Beckett, "Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab," *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 335-344, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.043>

[12] EN 14651:2007+A1, Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 2007.

[13] EN 14889-2, Fibres for concrete. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity, 2008.

[14] M. G. Alberti, A. Enfedaque, J. C. Gálvez y V. Agrawal, «Reliability of polyolefin fibre reinforced concrete beyond laboratory sizes and construction procedures,» *Composite Structures*, vol. 140(15), pp. 506-524, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.068>

[15] M. G. Alberti, A. Enfedaque y 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*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.12.032>

[16] M. N. Soutsos, T. T. Le y A. P. Lampropoulos, «Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres,» *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 704-710, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042>

[17] AENOR, UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas, 2012.

[18] AENOR, UNE-EN 12350-2. Testing fresh concrete-Part 2: Slump test, European Committee for Standardization, 2002.

[19] EN 12390-3, «Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens,» 2009.

[20] M. G. Alberti, A. Enfedaque y J. C. Gálvez, «Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete,» *Construction & Building Materials*, vol. 85(15), pp. 182-194, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.007>

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Sika-SAU su colaboración y el suministro de las fibras. Además agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad la concesión del Proyecto BIA2016-78742-C2-2-R.