

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Combinación de fibras de acero de última generación para el refuerzo de hormigón autocompactante

M.G. Alberti ⁽¹⁾, A. Enfedaque ⁽¹⁾, J.C. Gálvez ⁽¹⁾ y A. Cortez ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. C / Profesor Aranguren, s/n, 28040, Madrid.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5152>

RESUMEN

Dado que la mayor desventaja mecánica del hormigón son sus propiedades en tracción, las fibras normalmente se utilizan para mejorar la respuesta frente a sollicitaciones de tracción y flexión, siendo las fibras de acero las más comúnmente utilizadas. Este tipo de fibras se ha utilizado con éxito en aplicaciones estructurales en los últimos 50 años y, como consecuencia, se han desarrollado nuevas fibras de acero de última generación de las que existe una bibliografía muy limitada. En este estudio se realizó una caracterización de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero de última generación a través de ensayos de caracterización mecánica y de resistencia a la tracción por flexión. Se realizaron tres amasadas diferentes con la misma dosificación de 70 kg/m³ de fibras (0,89% en fracción volumétrica). Las dos primeras con un solo tipo de fibra por amasada (5D y OL) y la tercera con la combinación de estas dos fibras en iguales proporciones, observando que combinadas presentan un comportamiento optimizado como refuerzo del hormigón. Los resultados obtenidos mostraron importantes mejoras combinando ambas tipologías de fibras.

PALABRAS CLAVE: Autocompactante – Fibras de acero – Fractura.

1.- INTRODUCCIÓN

Actualmente existen varios tipos de fibras que se emplean como refuerzo del hormigón, y que cumplen con los requisitos de la normativa para poder sustituir a las barras de acero del hormigón armado, esencialmente las macro-fibras sintéticas y las fibras de acero [1, 2]. Son estas últimas las más utilizadas debido a su eficaz comportamiento y a que al mismo tiempo son con las que se cuenta con mayor experiencia ya que se ha llevado a cabo aplicaciones estructurales con el concepto moderno de hormigón reforzado con fibras (HRF) desde hace más de 50 años [3]. El eficaz comportamiento de las fibras de acero afecta esencialmente a la mejora del comportamiento frente a sollicitaciones de flexión y tracción, suponiendo un incremento significativo de la energía de fractura, la reducción de la deformación bajo cargas mantenidas, el aumento de la resistencia a tracción, la fisuración controlada y por

ende al aumento de su ductilidad y durabilidad. [4]. En función de su sección transversal, las fibras tienen diámetros equivalentes entre 0,15 y 2 mm y variedad de longitudes las cuales se encuentran entre los 7 y los 75 mm. El comportamiento del HRF depende principalmente de la dosificación de fibras y de sus características mecánicas y geométricas, además del posicionamiento final de dichas fibras [5]. En cuanto a la influencia de la geometría de las fibras, formas y dimensiones, sobre el comportamiento del HRF, la relación longitud-diámetro equivalente es el parámetro más característico, ya que de su valor dependen en buena medida la ductilidad y la tenacidad del hormigón resultante [6]. Por otra parte, las características mecánicas de las fibras, esencialmente su resistencia a tracción y módulo de elasticidad, juegan un rol fundamental en el comportamiento del hormigón reforzado con fibras. Por otro lado, la forma influye notablemente en la resistencia al arrancamiento y, como consecuencia las propiedades post-fisuración del HRF varían [7, 8]. Es importante señalar que todas las características anteriormente citadas se conjugan para generar el comportamiento de dicho hormigón reforzado con fibras. El resultado óptimo depende de una adecuada combinación de todos los factores, ya que cada uno por sí solo tiene siempre un límite en su influencia. Por ello, en investigaciones previas se obtuvieron importantes sinergias combinando distintas fibras aprovechando el mejor comportamiento de cada tipo de fibras para cada estado de deformación [9].

En la presente investigación se utilizaron fibras de acero con resistencias a tracción de 2300 y 2600 N/mm² y relaciones de aspecto de 67 y 65 (5D y OL respectivamente). Se eligió una tipología de fibras con patillas y con longitud de 60 mm y una segunda tipología de fibras más cortas y lisas (13 mm). De este modo se buscó obtener un resultado optimizado para las aberturas de fisura iniciales, manteniendo importantes resistencias a la tracción por flexión para mayores deformaciones también. Los resultados permiten comparar el uso individual de cada tipo de fibras embebida en un hormigón autocompactante con los resultados obtenidos con la combinación de ambas fibras.

2.- CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para la elaboración del hormigón se utilizaron 425 kg/m³ de cemento Portland tipo EN 197-1 CEM I 52.5. Además, para conseguir la autocompactabilidad se empleó el 1,39% del peso del cemento del superplastificante de alto rendimiento Sika ViscoCrete-20HE. Por otra parte, buscando aumentar el contenido de finos para lograr la autocompactabilidad, se emplearon 210 kg de filler calizo por metro cúbico de hormigón. Se emplearon dos tipos de grava 4-8 mm y 8-12 mm, y un tipo de arena de 0-2 mm. Se emplearon dos tipos de fibras de acero. Se emplearon fibras 5D, consideradas de última tecnología ya que cuentan con una combinación exclusiva de la forma optimizada de las patillas, una gran ductilidad del acero y una elevada resistencia a tracción. El segundo tipo de fibras elegido se denomina comercialmente OL y se caracteriza por ofrecer un alto rendimiento y una elevada resistencia a la fisuración lo que las convierte en ideales para obtener una ductilidad óptima. Las características de las mismas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de las fibras

TIPO DE FIBRA	5D	OL
Forma	Extremos conformados	Recta
Densidad	7850 g/cm ³	7851 g/cm ³
Longitud	60 mm	13 mm
Diámetro Equivalente	0,90 mm	0,20 mm
Resistencia a tracción	2300 N/mm ²	2600 N/mm ²
Módulo de Elasticidad	210000 N/mm ²	210000 N/mm ²
# Fibras por kg	3132	314000

El hormigón reforzado con fibras está constituido esencialmente de los mismos componentes que un hormigón tradicional. La inclusión de fibras además de alterar el comportamiento del hormigón en estado endurecido, también lo hace en estado fresco, por lo que a algunos componentes del hormigón se les exige que cumplan condiciones adicionales que en los hormigones tradicionales no son necesarias. Estas modificaciones pasan principalmente por una limitación en el tamaño máximo del árido, menores valores de relación grava-arena, mayores cantidades de aditivos reductores de agua y mayor demanda de finos entre otros. Para la presente investigación se empleó una dosificación previamente optimizada mediante ensayos en la cual la dosificación de los áridos siguió el criterio de máxima compacidad en seco. Esta dosificación puede verse en la Tabla 2.

Tabla 2. Dosificación de la mezcla

DOSIFICACIÓN	
Relación a/c =0,47	Cantidad
Material	1 m ³
Agua	198,9 Kg
Cemento	425 Kg
Filler Calizo	210 Kg
Arena	947 Kg
Grava	291,6 Kg
Gravilla	194,4 Kg
Fibras de acero ($V_f=0,89\%$)	70 Kg
Superplastificante (1,39% peso cemento)	5,91 Kg

En cada amasada se fabricaron cuatro probetas prismáticas de 600x150x150 mm³ y cinco probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Todas ellas fueron introducidas en la cámara húmeda donde se mantuvo una humedad relativa $\geq 95\%$ con una temperatura de (20+2) °C durante los 28 días previos a la realización de los ensayos en estado endurecido.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como datos de referencia y con el objetivo de poder evaluar el aporte estructural de las fibras como refuerzo en la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados sobre hormigón sin fibras con la misma dosificación empleada en la presente investigación.

Tabla 3. Resultados hormigón sin fibras de referencia.

Escurrimiento		Tensión de Rotura			Módulo de Elasticidad (E)
Diámetro	T ₅₀	Compresión (f _{cm})	Tracción indirecta (f _{ct})	Flexotracción	
(mm)	(s)	MPa	MPa	MPa	GPa
660	3	59,7	4,69	5,52	34,2

Para identificar el comportamiento en estado fresco de los tres tipos de hormigón estudiados, se realizó el Ensayo de Escurrimiento EN 12350-8 y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

En este ensayo se pudo evidenciar que la presencia de fibras OL reduce la trabajabilidad del hormigón, ocasionando la aparición de erizos en la mezcla. Esto se debe principalmente a dos razones, la primera es que el tamaño de las fibras (13 mm) no cumple con la recomendación que establece que el tamaño de las fibras deberá ser mínimamente 2 veces el tamaño máximo del árido grueso. La segunda fue que las fibras OL no vienen encoladas, por lo que realizar una distribución homogénea de las mismas durante la amasada resulta más complicado. Por su parte, los hormigones reforzados únicamente con fibras 5D y con la combinación 5D-OL, alcanzaron las características mínimas necesarias para ser considerados autocompactantes clasificándose ambos como VS1-SF 1, según la instrucción EHE-08 [10].

Con el fin de obtener las características mecánicas de los diferentes hormigones estudiados, se realizaron los ensayos EN 12390-3, EN12390-6 y EN 12390-13 para obtener la resistencia a compresión, resistencia a tracción y el módulo de elasticidad, respectivamente. La resistencia a compresión se obtuvo ensayando tres probetas cilíndricas para cada tipo de hormigón y la media de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla 4.

Investigaciones previas muestran que la presencia de fibras no influye considerablemente en la resistencia a compresión, más al contrario con elevados volúmenes de fibras estas pueden afectar negativamente en esta propiedad. Sin embargo, a pesar de que el contenido

de fibras empleado (0,89%) puede considerarse elevado, todas las resistencias alcanzadas superan la del hormigón sin fibras.

Tabla 4. Resultados ensayos en estado fresco y características mecánicas.

Hormigón	Ensayo Escurrimiento		f_{cm} (MPa)	E (GPa)	f_{ct} (MPa)
	df (mm)	t_{500} (s)			
5D	660	3	63,8	33,9	7,69
OL	520	3	66,9	32,8	7,15
5D-OL	585	3	64,7	40,7	8,05

Para la obtención del módulo de elasticidad se repitió tres veces el mismo ensayo en una probeta cilíndrica correspondiente a cada una de las amasadas realizadas. La media de los valores obtenidos en el ensayo se presenta en la Tabla 5, donde se observa que el hormigón reforzado con la combinación de fibras 5D-OL presenta un módulo de elasticidad mucho más elevado que el resto, incluso que el hormigón simple de referencia.

El ensayo de tracción indirecta se realizó en dos probetas cilíndricas de cada tipo de hormigón y la media de las resistencias alcanzadas se presenta en la Tabla 5 donde se puede ver que la tensión de rotura de los hormigones se encuentra entre los 7,15 MPa y los 8,05 MPa para fibras OL y la combinación de fibras 5D-OL respectivamente, observando que, si bien el hormigón reforzado con fibras OL fue el que alcanzó la mayor resistencia a compresión, el mismo presenta un comportamiento contrario cuando es sometido a tracción indirecta. Como ya se ha comentado previamente, una de las principales ventajas del uso de fibras como refuerzo en el hormigón es que éstas incrementan su resistencia a tracción, en el caso particular de la presente investigación vemos que el incremento de resistencia está comprendido entre el 52,4% y el 71,6% con fibras OL y la combinación de fibras 5D-OL respectivamente.

Para poder comparar adecuadamente las mejoras en tracción, se realizaron ensayos de resistencia a la tracción por flexión, mediante el ensayo normalizados de la norma EN 14651 con tres probetas prismáticas para cada tipo de hormigón. Para el hormigón reforzado con fibras 5D se ensayó una cuarta probeta debido a la dispersión de los resultados obtenidos. En la Figura 2 se puede ver que la presencia de fibras 5D ocasiona dos superficies de fallo diferentes en el mismo hormigón, una siguiendo la dirección de la entalla realizada y otra desviándose de la misma. Esto se debe a principalmente a una mayor concentración de fibras que ocasiona el cambio de dirección. Una vez ensayadas las probetas se realizó el conteo de fibras en la superficie de fractura para obtener los coeficientes de orientación para cada uno de los diferentes tipos de fibras estudiados. Para el caso de las fibras 5D, se pudo evidenciar que las cargas más elevadas correspondientes a las superficies de fractura desviadas, corresponden también a los mayores coeficientes de orientación.

En las figuras 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se muestran las curvas fuerza-abertura de fisura (CMOD) y las curvas fuerza-flecha de todos los ensayos y la media de todos los tipos de HRF

fabricados. Además, se realizaron conteos manuales de las fibras en las superficies de fractura para poder obtener el coeficiente de orientación y los resultados se muestran en la Tabla 5.

Como se mencionó anteriormente, en el caso de las fibras 5D, las cargas mayores corresponden a los coeficientes de orientación más elevados. Se ve claramente que la probeta 5D-P1 alcanza la mayor carga en el límite de proporcionalidad con un coeficiente de orientación de 0,48 mayor que el 0,42 y el 0,36 correspondientes a las probetas P4 y P3 respectivamente. Por otra parte, se observa que las fibras 5D permiten al hormigón alcanzar flechas mayores a los 13 mm, con importante resistencia residual.

Con relación a las fibras OL, se observa que éstas presentan un comportamiento menos disperso y cargas en el límite de proporcionalidad ligeramente inferiores que las fibras 5D. En la Figura 6, se puede ver que la máxima flecha alcanzada con las fibras OL es de alrededor de 10 mm como consecuencia de la longitud de las fibras de 13mm.



Figura 1. Ensayo UNE-EN 14651 hormigón con fibras 5D.

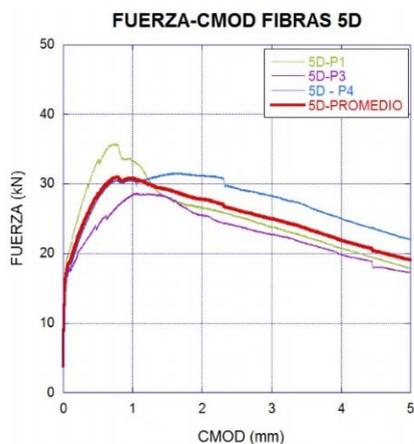


Figura 2. Curva FUERZA-CMOD fibras 5D

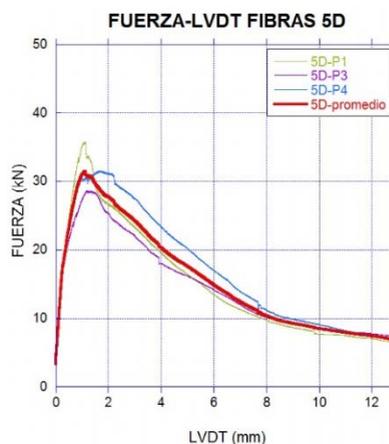


Figura 3. Curva FUERZA-LVDT fibras 5D

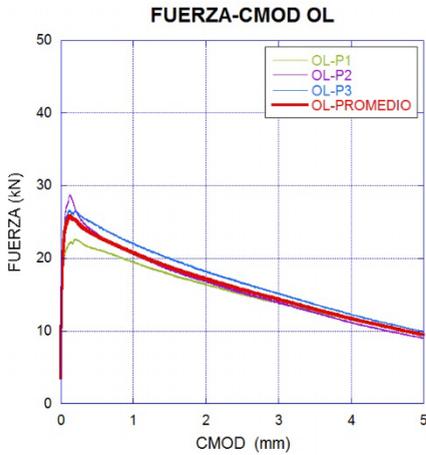


Figura 4. Curvas FUERZA-CMOD fibras OL

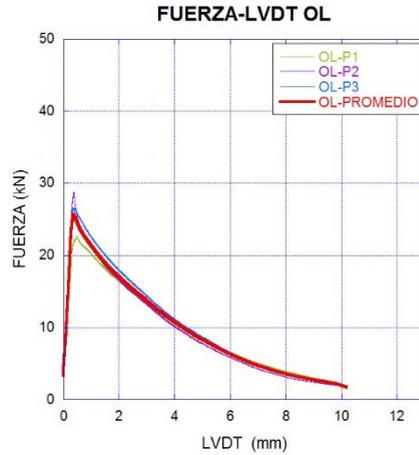


Figura 5. Curvas FUERZA-LVDT fibras OL

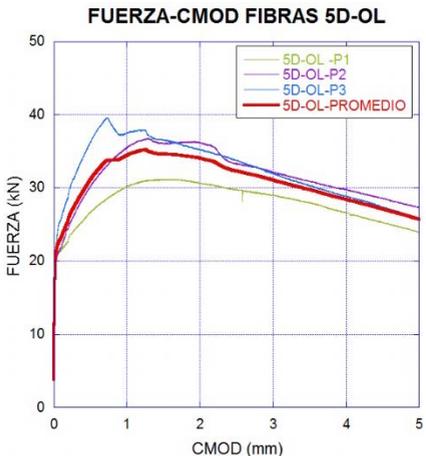


Figura 6. Curvas FUERZA-CMOD fibras 5D-OL

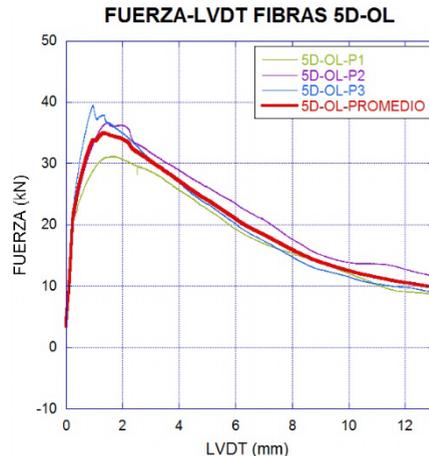


Figura 7. Curvas FUERZA-LVDT fibras 5D-OL

Si comparamos el uso de fibras 5D y OL por separado o combinadas (ver figuras 7 y 8) en iguales proporciones, se observa que juntas optimizan su comportamiento como refuerzo del hormigón, alcanzando mayores cargas pico y resistiendo cargas más elevadas para aperturas de fisura y flechas más grandes, lo que implica mayor absorción de energía antes de la rotura. Vemos además, que la combinación permite resistir una carga de 10 kN para una flecha de 13 mm, carga que no se alcanzó con ninguna de las fibras cuando fueron usadas por separado.

Para realizar un análisis más detallado en las figuras 9 y 10 se comparan las curvas promedio del hormigón reforzado con la combinación de fibras 5D-OL y la curva resultante

de sumar el 50% de la curva media de hormigón reforzado con fibras 5D más el 50% de la curva media del hormigón reforzado con fibras OL. Este procedimiento permite estimar las posibles sinergias de su utilización conjunta, si bien sería necesario contrastar los resultados fabricando las probetas correspondientes con 35 kg/m³ de cada tipo de fibras para seguir el procedimiento de la referencia [9]. En las figuras 9 y 10 se observa que la pendiente de la curva de descarga es muy similar, pero no fue así para la carga en el límite ni para la energía de fractura, optimizándose el comportamiento de estas fibras cuando se encuentran combinadas, probablemente por una mejora del factor de orientación.

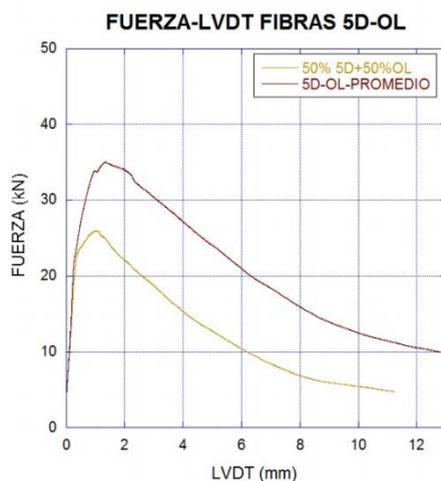
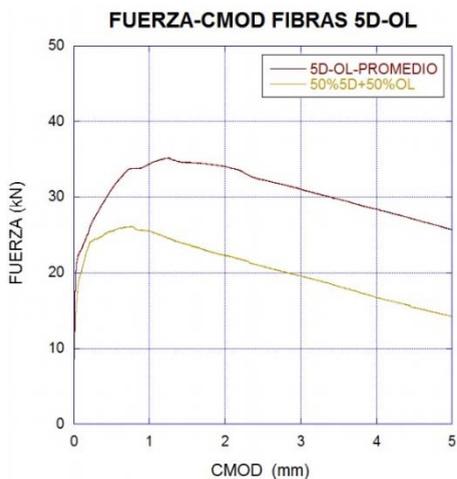


Figura 8. Curvas FUERZA-CMOD fibras 5D-OL Figura 9. Curvas FUERZA-LVDT fibras 5D-OL

Tabla 5. Coeficientes de orientación de las fibras

PROBETA	# FIBRAS TEÓRICO		# FIBRAS REAL		COEF. DE ORIENTACIÓN	
5D P-1	314		151		0,48	
5D P-2	314		265		0,84	
5D P-3	314		114		0,36	
5D P-4	314		133		0,42	
OL P-1	6374		1001		0,16	
OL P-2	6374		922		0,14	
OL P-3	6374		1037		0,16	
	5D	OL	5D	OL	5D	OL
5D-OL P-1	157	3187	78	417	0,5	0,13
5D-OL P-2	157	3187	102	425	0,65	0,13
5D-OL P-3	157	3187	110	477	0,7	0,15

La Tabla 5 muestra la mejora del coeficiente de orientación de las fibras 5D cuando se combinaron con fibras OL. La Figura 11 muestra la energía absorbida a diferentes valores de flecha alcanzados por las probetas ensayadas. Se observa que la combinación de las fibras optimiza su comportamiento absorbiendo mayor energía para iguales flechas.

Finalmente, en la Figura 12 se han incluido los valores medios de resistencia a la tracción por flexión. En la figura puede verse que la combinación de fibras 5D-OL presenta un comportamiento estable con menores variaciones de sus resistencias residuales. Cabe recalcar que tanto las fibras 5D como OL, independientes o combinadas, cumplen con los requisitos establecidos por la EHE-08 [10] para ser consideradas como refuerzo estructural.

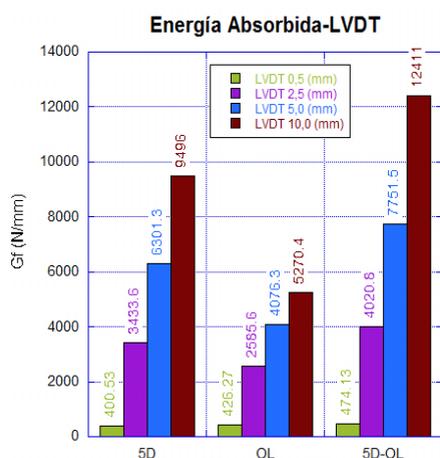


Figura 10 Energía absorbida para distintas flechas

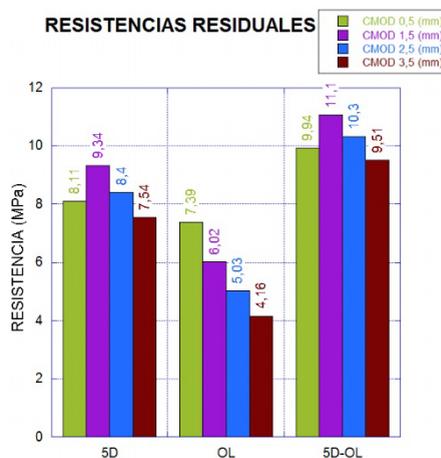


Figura 11 Resistencias Residuales

4.- CONCLUSIONES

Para una dosificación constante de fibras de 70 kg/m^3 , el hormigón en estado fresco mantuvo las propiedades autocompactantes, exceptuando el HRF únicamente con fibras OL las cuales impidieron que la mezcla alcanzara la autocompactabilidad.

A pesar de que el contenido de fibras de $0,89\%$ en volumen puede considerarse elevado, este no tuvo un efecto negativo en la resistencia a compresión en ninguno de los hormigones. La resistencia a tracción indirecta se vio incrementada entre el 50 y 70% en función de las fibras utilizadas como refuerzo.

Analizando el comportamiento en los ensayos de resistencia a la tracción por flexión, todas las dosificaciones cumplieron con los requisitos estructurales de la EHE-08.

Se observó que los hormigones reforzados con fibras 5D presentaron dos superficies de fallo, una siguiendo la dirección de la entalla y otra una dirección diferente. Esto se produjo debido a una mayor concentración de fibras que ocasiona un cambio de dirección de la fisura. En los hormigones reforzados con fibras OL, la fisura siguió la dirección de la entalla hasta el fallo.

Cuando se comparó el uso de fibras 5D y OL por separado y combinadas en iguales proporciones, se observó que juntas optimizaron el comportamiento como refuerzo del hormigón, proporcionando al material resistencias residuales a tracción significativamente mayores.

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.

REFERENCIAS

- [1] M. G. Alberti, "Polyolefin fibre-reinforced concrete: from material behaviour to numerical and design considerations". Universidad Politécnica Madrid, 2015.
- [2] 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.
- [3] P. Serna, "Recientes ejemplos estructurales de aplicación de hormigón de fibras," *Monografía sobre aplicaciones estructurales de hormigones con fibras*, pp. 33-47, 2007.
- [4] M. G. Alberti, A. Enfedaque and J. Gálvez, "On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 55, pp. 274-288, 2014.
- [5] M. Pająk and T. Ponikiewski, «Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers,» *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 397-408, October 2013.
- [6] S. Yazici, G. Inan and V. Tabak, «Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC,» *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1250-1253, 2007.
- [7] M. Cunha Victor, M. Sena-Cruz José and A. Barros Joaquim, «Pullout behaviour of hooked-end steel fibres in self-compacting concrete,» Report 07-DEC/E06, 2007.
- [8] M. G. Alberti, A. Enfedaque, J. C. Gálvez and A. Ferreras, "Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes," *Construction & Building Materials* vol. 112, pp. 607-622, 2016.
- [9] M. G. Alberti, A. Enfedaque, J. C. Gálvez, M. F. Cánovas and I. R. Osorio, "Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions," *Materials & Design*, vol. 60, pp. 57-65, 2014.
- [10] EHE-08, Spanish Structural Concrete Code, Spanish Minister of Public Works, 2008.