

Caracterización experimental de la resistencia a tracción y cortante del hormigón reforzado con fibras de poliolefina

Experimental assessment of the tensile and shear strength behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete



Álvaro Picazo¹, Marcos Alberti², Alejandro Enfedaque² y Jaime Gálvez²

¹ Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Edificación. Dpto. de Tecnología de la Edificación. Av. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid (España).

² Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Dpto. de Ingeniería Civil: Construcción. C/ Profesor Aranguren, s/n - 28040 Madrid (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9022> | Recibido: 29/10/2018 • Inicio Evaluación: 30/10/2018 • Aceptado: 06/02/2019

ABSTRACT

- In the last decades, certain types of non-metallic fibres have been found suitable for structural concrete elements. Polyolefin macro-fibres can meet the requirements set in the standards in order to consider their contribution in the structural design. Previous experimental campaigns carried out with polyolefin fibre reinforced concrete (PFRC) have evaluated their flexural fracture behaviour, with several amounts of fibre dosages. Given that the structural requirements were set based on the results obtained by following UNE-EN 14651:2007+A1 that only considers the flexural behaviour, the contributions of the fibres when the structural element is subjected to more complex stress states is a matter that deserves further studied. The main objective of this contribution is to assess the performance of PFRC subjected to tensile stresses and shear stresses, using low performance concrete and water/cement ratio greater than the maximum indicated by the EHE-08, that can be used in ground slabs, gutters and pipes, replacing traditional reinforcement. This was carried out developing uniaxial tensile tests and push-off tests. In order to do so, the remaining halves of PFRC samples already tested following UNE-EN 14651 were used. Two PFRC formulations were studied, one with 6kg/m³ of fibres and another with 7.5kg/m³ of fibres. In both cases 48mm-long fibres were added. These tests were also recorded in order to analyse the damage patterns and the appearance, growing and coalescence of cracks by means of digital image correlations techniques. Non-standardised test results showed a remarkable PFRC behaviour both under tensile and shear stresses. Such results confirmed the suitability of PFRC as a structural material. In addition, the test results widened the knowledge of the mechanical response of PFRC under complex stress states.
- **Keywords:** Polyolefin fibre reinforced concrete, uniaxial, push-off, digital image correlation.

RESUMEN

En los últimos años, algunos tipos de fibra no metálica han demostrado ser adecuados para elementos estructurales de hormigón. Las macro-fibras de poliolefina han demostrado que pueden cumplir los requisitos exigidos por las normas para tener en cuenta su contribución en el diseño estructural.

Campañas experimentales previas con hormigones reforzados con fibras de poliolefina (HRFP) permitieron evaluar satisfactoriamente el comportamiento de resistencia a la tracción por flexión

de estos hormigones con diferentes dosificaciones de fibras. Debido a que los requisitos estructurales fijados en las normativas para los HRF están basados principalmente en resultados de ensayos de tracción por flexión según la norma UNE-EN 14651:2007+A1, la aportación de las fibras cuando el elemento estructural está sometido a estados tensionales más complejos es un tema que todavía está en fase de estudio.

El objetivo de esta contribución fue evaluar el comportamiento de los HRFP sometidos a esfuerzos de tracción directa y cortante, empleando hormigón de bajas prestaciones y relación agua/cemento superior a la máxima indicada por la EHE-08, que puede ser usado en zanjas, soleras, cunetas y canalizaciones, sustituyendo al armado tradicional. Se realizaron sendas campañas experimentales mediante ensayos uniaxiales y "push-off". Las probetas se obtuvieron de las mitades restantes de las probetas utilizadas para ensayos de resistencia a tracción por flexión con 6 y 7,5 kg/m³ de fibras de poliolefina de 48 mm de longitud. Estos ensayos se complementaron con técnicas de grabación de vídeo que permitieron la obtención de los patrones de fisuración de las probetas.

Los resultados mostraron el buen comportamiento a tracción y cortante de los HRFP mediante ensayos no normalizados, completando la información sobre su comportamiento.

Palabras clave: Hormigón reforzado con fibras de poliolefina (HRFP), uniaxial, "push-off", vídeo-extensometría.

1. INTRODUCCIÓN

El uso del hormigón en infraestructuras y edificación requiere conocer sus propiedades mecánicas. El hormigón se caracteriza por buena resistencia a compresión, aunque muestra una reducida resistencia a tracción [1] y, además, es un material con baja ductilidad [2].

Además del uso de las armaduras de acero en su masa, otras técnicas se han ido introduciendo para conseguir mejorar la resistencia a tracción sin mermar la de compresión. Una de estas técnicas es la adición de fibras [3]. Las fibras fueron originalmente residuos de acero y los primeros estudios con el concepto moderno de hormigón reforzado con fibras (HRF) datan de mediados del siglo XX [4]. Tras el uso del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) [5] otros tipos de fibras han sido empleadas y estudiadas, entre ellas las macro-fibras estructurales de poliolefina [6, 7].

Las normativas [8, 9] consideran al HRF como un material con características estructurales, siempre que se cumplan determinados requisitos. Estos se basan en resultados de ensayos de

resistencia en el límite de proporcionalidad (f_{L0P}) dependen únicamente de la matriz de hormigón, no viéndose afectados por la cantidad de fibras. Además, es importante considerar que con cuantías más elevadas de fibras la compactación puede empeorar, teniendo un efecto adverso en la resistencia a compresión.

2.2. PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS

Tras la realización de los ensayos a tracción por flexión anteriormente citados, se obtuvieron las probetas para la presente campaña experimental mediante mecanización de las dos mitades resultantes de los ensayos. De esta manera se obtuvieron probetas de dimensiones 250x150x150 mm³ para los ensayos uniaxiales y de 270x150x150 mm³ para los ensayos "push-off".

Para los ensayos uniaxiales se realizaron unas entallas perimetrales de 9 mm de espesor y 45 mm de profundidad a las probetas, lo que generó una sección resistente de ligamento de 60x60 mm².

En el caso de las probetas para los ensayos "push-off" se realizaron dos entallas de 75 mm de profundidad y 9 mm de espesor en sus lados opuestos. Se consiguió crear una superficie de unión en el centro de la probeta de 90x150 mm². Además, las probetas fueron reforzadas exteriormente con fibra de carbono, adherida con resina epoxi, para evitar roturas por flexión de los voladizos.

En las entallas se dispusieron dos LVDT para medir el desplazamiento, lo que permitió medir las posibles rotaciones relativas de la probeta. Se dispuso además un sistema de grabación con el

que se pudo captar la aparición de fisuras y analizar su desarrollo.

Los ensayos se realizaron con una máquina de ensayos de 0,5 MN de capacidad y los ensayos se controlaron con desplazamiento del actuador, con velocidades de 5 μm/s para los ensayos uniaxiales y de 1 μm/s para los ensayos "push-off". Los datos obtenidos de cada uno de los ensayos fueron: tiempo, carga, desplazamiento del actuador y de los LVDT.

Respecto al sistema de grabación se puede indicar que, un software comercial de vídeo-extensometría, permitió medir las deformaciones que se producían en la zona de estudio de las probetas basándose en relacionar sus imágenes con el movimiento relativo de un punto a tiempo "0" y la posición de ese mismo punto a tiempo "t" [18]. Los ensayos fueron grabados mediante dos cámaras de alta definición de 5 MPx.

2.3. MONTAJE DE LOS ENSAYOS UNIAXIALES

Se buscó obtener la carga y tensión máxima soportados por la probeta hasta rotura, y las resistencias residuales que proporcionan las fibras en el hormigón. Otro parámetro a valorar es la cantidad de fibras en la sección resistente. Para conseguir la correcta unión de la probeta de hormigón con la máquina de tracción fue necesario adherir, mediante resina epoxi de dos componentes CeyS Araldite Standard®, la probeta de hormigón a una cazoleta superior y otra inferior. Las cazoletas disponían de roscas por las que se introdujeron sendas barras roscadas. La barra roscada superior se enlazó con una rótula y ésta al anclaje superior de la prensa. La barra roscada inferior se conectó al actuador de la máquina. Una vez montada la probeta se procedió a la colocación de los LVDT y, posteriormente, las cámaras para la grabación del ensayo. Las imágenes permitieron, mediante el software libre "Image J", determinar la inexistencia de deslizamiento entre las cazoletas y la probeta, lo que aseguró la precisión de los análisis de desplazamientos. En la Figura 1(c) se puede ver una imagen del montaje de estos ensayos y en la Figura 2(a) se puede ver una probeta después de ser ensayada.

2.4. MONTAJE DE LOS ENSAYOS "PUSH-OFF"

En estos se pretendió obtener los resultados de cargas y tensiones pico, así como las cargas y desplazamientos residuales a cortante. Se analizaron las superficies de fractura y se contaron las fibras de la sección. Resulta necesario concentrar de manera correcta la carga sobre la superficie de ligamento de las probetas. Para ello se dispusieron dos barras de acero de sección cuadrada de 10x10 mm² en las caras superior e inferior de las mismas. Una vez dispuesta en su posición la probeta, se colocaron los dos LVDT y se dispusieron las cámaras de alta definición. La Figura 2(b) muestra una probeta después del ensayo "push-off".



Fig. 2(a): Probeta ensayada en ensayo uniaxial y 2(b): Probeta ensayada en ensayo "push-off"

	Ensayos uniaxiales		Ensayos "push-off"	
	HP7,5	HP6	HP7,5	HP6
Hormigón	HP7,5	HP6	HP7,5	HP6
Nº de probetas	3	3	4	4
S (cm ²)	36,02 (0,07)	40,14 (0,30)	132,52 (0,01)	124,48 (0,04)
F _{MAX} (kN)	6,63 (0,07)	8,11 (0,09)	61,09 (0,15)	58,13 (0,08)
σ _{MAX} (MPa)	1,84 (0,12)	2,02 (0,22)	-	-
τ _{MAX} (MPa)	-	-	4,61 (0,14)	4,67 (0,09)
Nº fibras (n)	31 (0,14)	17 (0,04)	67 (0,29)	47 (0,11)
σ _{RES} (MPa)	0,53 (0,01)	0,28 (0,11)	-	-
τ _{RES} a 5mm (MPa)	-	-	0,93 (0,03)	0,73 (0,15)

Tabla 3: Dimensiones medias de secciones resistentes de probetas, fuerza media máxima, tensión longitudinal media máxima, tensión rasante media máxima, número de fibras en la sección resistente, tensión longitudinal residual y tensión rasante residual

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los datos se obtuvieron las curvas tensión–desplazamiento y carga–desplazamiento de la Figura 3. Estas curvas fueron analizadas junto con el análisis de deformaciones y con el conteo del número de fibras.

En ambos ensayos el comportamiento resultó el esperado: una primera rama de tensión de tipo lineal dependiente únicamente de la matriz cementicia. A partir de ese punto se produjo un descenso brusco de tensión hasta la entrada en carga de las fibras. A partir de este punto la resistencia residual mantuvo sus valores e incluso los aumentó en algún periodo del ensayo. La Tabla 3 muestra los valores medios de los resultados obtenidos en los ensayos. En dicha Tabla se indican las secciones resistentes, la fuerza máxima, la

tensión máxima, el número de fibras en la sección de ligamento, las tensiones residuales a diferentes desplazamientos y los coeficientes de variación, entre paréntesis.

Se puede ver con claridad la enorme influencia que tienen las fibras en el comportamiento residual del hormigón. Si se comparan las cargas o las tensiones máximas que se han producido resulta apreciable que, independiente de la dosificación de fibras, los valores alcanzados son completamente parejos (τ_{MAX}), por lo que se puede asegurar que las fibras de poliolefina no aumentan la resistencia máxima del hormigón. A partir del punto de máxima carga se puede ver el aumento de ductilidad en el hormigón. En lugar de roturas frágiles los hormigones fibro-reforzados se comportan de manera dúctil, manteniendo cargas residuales debidas a la tracción de las fibras.

3.1. ENSAYOS UNIAXIALES DE TRACCIÓN DIRECTA

En la Figura 3(a) se muestran las curvas carga-desplazamiento de las probetas ensayadas de cada tipo de HRFP. Todas las muestras han soportado una carga media de fractura del hormigón similar, siendo dicho valor de 6,63 kN para las probetas HP7,5 y de 8,11 kN para las muestras HP6. La tensión residual media, ha sido superior en las muestras con mayor cantidad de fibras, con valores de 0,53 N/mm² frente a 0,28 N/mm².

3.2. ENSAYOS "PUSH-OFF" A CORTANTE

En la Figura 3(b) se muestran las curvas medias. Si hablamos de los valores de la τ_{MAX} los dos hormigones obtuvieron cifras semejantes, ya que la matriz de hormigón tiene la misma composición. El HP6 alcanzó una tensión cortante media de 4,67 MPa, por encima de la del HP7,5, que fue de 4,61 MPa. Al igual que el HP6

leccionar la imagen de dicho segundo. El análisis permitió obtener los desplazamientos en dicho momento y, por tanto, correlacionar tensiones y desplazamientos.

3.3.1. Ensayos uniaxiales

Las probetas del ensayo uniaxial han tenido un comportamiento en fractura igual, independiente de la cuantía de fibras. En la Figura 4(a) y 4(b) se muestran las imágenes de la fisura producida en una probeta HP6, correspondientes al inicio y propagación de la fisura. En todas las probetas estudiadas la fisura se produce en uno de los extremos de la entalla, para propagarse hasta el final opuesto. Una vez se produce la fisura completa en la sección de ligamento los únicos elementos resistentes a tracción son las fibras, por lo que se puede aseverar que las cargas residuales son función únicamente de la resistencia de dichas fibras.

3.3.2. Ensayos "push-off"

En los ensayos a cortante se ha podido comprobar un comportamiento diferente del hormigón en función de la cuantía de fibras. Además se ha comprobado que una vez generada la fisura las fibras "cosen" dicha fisura y trabajan junto con el mecanismo de "corte-fricción" de la matriz de hormigón.

En una de las probetas tipo HP7,5 la fisura se generó en el momento de alcanzarse la máxima carga del ensayo. La Figura 5(a) muestra la superficie de rotura un instante después de la rotura, en la que se puede apreciar una concentración de tensiones generada en el vértice de la entalla inferior que se propaga en sentido casi vertical a lo largo de la sección de ligamento.

En otra de las probetas tipo HP7,5, con un desplazamiento a cortante de 0,67 mm, veinte segundos después del instante en el

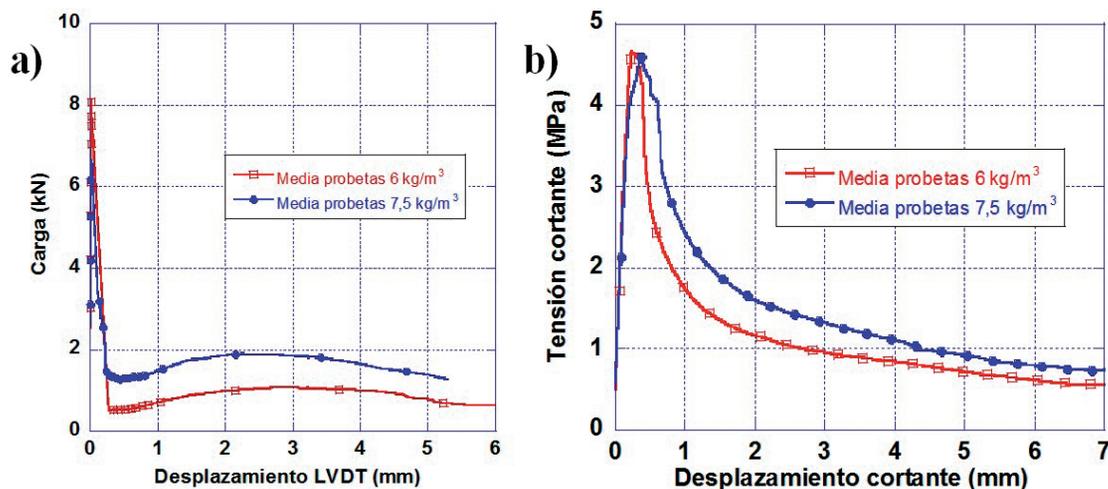


Fig. 3(a): Curvas medias carga-desplazamiento en los ensayos uniaxiales y 3(b): Curvas medias tensión-desplazamiento en los ensayos "push-off"

consiguió la mayor tensión tangencial, a partir de esa tensión, sus tensiones residuales son siempre inferiores a las mostradas por el HP7,5. Estos resultados muestran que en el comportamiento previo a la fisuración es la matriz de hormigón la que tiene toda la influencia, en tanto que la rama residual está gobernada por el número de fibras.

3.3. ESTUDIO DE VÍDEO-EXTENSOMETRÍA

Para realizar este análisis se sincronizaron las imágenes de las probetas con los valores de tiempo, carga y desplazamiento de los ensayos. Esta relación permite obtener, para un valor de carga y deformación, el segundo de ensayo en que se produjo ésta y se-

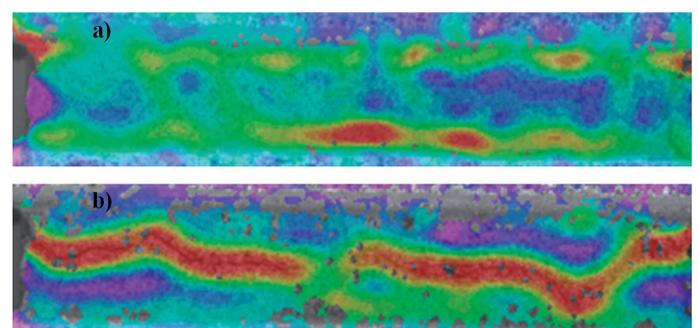


Fig. 4(a): Probeta de ensayo uniaxial en el momento de la generación de la fisura y 4(b): La misma probeta muestra la fisura ya desarrollada

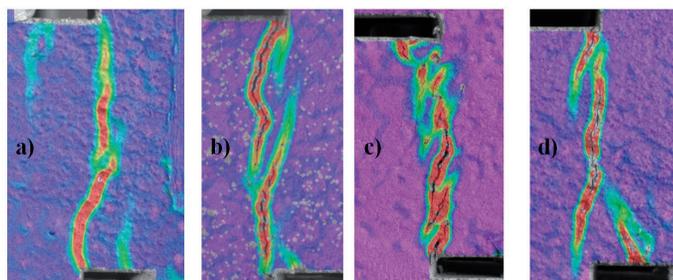


Fig. 5: Probetas en el instante de fisuración. 5(a) y 5(b): Dos probetas HP7,5 y 5(c) y 5(d): Dos probetas HP6

que se alcanzó la máxima carga, y coincidente con el momento de inicio de la fisura en la punta de la entalla inferior, se observó la propagación de la fisura hasta la entalla superior. El proceso de generación y avance de las fisuras observado fue la aparición inicial de dos fisuras, en los bordes de las entallas superior e inferior, desarrollándose posteriormente hacia la entalla contraria. En la zona central de la superficie de rotura las fisuras no se encontraron, sino que se desarrollaron solapándose en forma de paréntesis, según la Figura 5(b).

En algunas probetas HP6 se observó que la fisura no nació desde los vértices de las entallas como en el caso de las probetas de HP7,5, sino que se generó en la zona central-inferior de la superficie en estudio. El desarrollo posterior sí es similar al de las probetas HP7,5, solapándose en especie de red de fisuras que termina comunicando las entallas, según se aprecia en la Figura 5(c).

Analizando otra de las probetas HP6, se observó que la fisura comenzó a desarrollarse de forma vertical partiendo del vértice de la entalla superior y se desarrolló en dos direcciones: una casi vertical en la zona central de la probeta y con inclinaciones marcadas desde la entalla superior y hasta alcanzar la entalla inferior, como se ve en la Figura 5(d).

4. CONCLUSIONES

Se realizó una completa caracterización mecánica en fractura de HRFP, con resistencia a compresión moderada y relación agua/cemento superior a la máxima indicada por la EHE-08, cuando está sometido a sollicitaciones de tracción o cortante.

La presencia de fibras dota al material de un comportamiento dúctil frente a sollicitaciones normales de tracción y a cortante. Este comportamiento evita el colapso del hormigón una vez rota la matriz cementante, proporcionando un grado de seguridad ante situaciones accidentales de proyecto como sismo o impacto.

Los valores de fuerza y tensión máxima se encuentran ligados a las propiedades resistentes de la matriz, no mostrando una clara correlación entre la dosificación de fibras y los valores hallados.

La capacidad residual, la tenacidad y ductilidad están influidas por el número de fibras presentes en la sección. Las fibras gobiernan el comportamiento post-fisuración del hormigón reforzado con fibras.

El análisis mediante vídeo-extensometría permitió analizar la fisuración de las probetas. En los ensayos uniaxiales las probetas se fisuraron de la misma forma, independiente de la cuantía de fibras. En los ensayos "push-off" se produjo un comportamiento diferente en relación a la dosificación de las fibras.

REFERENCIAS

[1] E. Torroja, Razón y ser de los tipos estructurales. Editorial CSIC-CSIC Press, 2007.

[2] 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.

[3] J. A. Lopez, P. Serna, E. Camacho, H. Coll, and J. Navarro-Gregori, "First ultra-high-performance fibre-reinforced concrete footbridge in Spain: design and construction," *Structural Engineering International*, vol. 24, no. 1, pp. 101-104, 2014. <https://doi.org/10.2749/101686614X13830788505793>

[4] J. P. Romualdi and J. A. Mandel, "Tensile strength of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement," in *Journal Proceedings*, 1964, vol. 61, no. 6, pp. 657-672. <https://doi.org/10.14359/7801>

[5] P. Serna, S. Arango, T. Ribeiro, A. Núñez, and E. Garcia-Taengua, "Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain," *Materials and structures*, vol. 42, no. 9, pp. 1233-1246, 2009. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9540-9>

[6] M. G. Alberti, "Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete: From Material Behavior to Numerical and Design Considerations," Ph. D. Thesis, Technical University Madrid, Madrid, Spain, 2015. [Google Scholar], 2015.

[7] J. K. Jeon, W. Kim, C. K. Jeon, and J. C. Kim, "Processing and mechanical properties of macro polyamide fiber reinforced concrete," *Materials*, vol. 7, no. 12, pp. 7634-7652, 2014. <https://doi.org/10.3390/ma7127634>

[8] Ministerio de Fomento, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Madrid, España: Ministerio de Fomento, 2008.

[9] International Federation for Structural Concrete (fib), *The fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2010.

[10] Test Method for Metallic Fiber Concrete. Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual; EN14651:2007+A1, 2007.

[11] 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. 55, pp. 274-288, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.024>

[12] M. G. Alberti, A. Enfedaque, and 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.007>

[13] Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting strength of test specimens; EN 12390-6, 2010.

[14] J. Echegaray, "Upgrading the push-off test to analyze the contribution of steel fiber on shear transfer mechanisms," 2014.

[15] Á. Picazo, J. C. Gálvez, M. G. Alberti, and A. Enfedaque, "Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital image correlation," *Construction and Building Materials*, vol. 181, pp. 565-578, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.235>

[16] P.-C. Hung and A. Voloshin, "In-plane strain measurement by digital image correlation," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 215-221, 2003. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782003000300001>

[17] Testing Hardened Concrete. Part 3: Compressive Strength of Test Specimens; EN 12390-3, 2009.

[18] R. Cintron and V. Saouma, "Strain measurements with the digital image correlation system Vic-2D," *System*, vol. 106, p. 2D, 2008.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Empresa la concesión de la ayuda BIA2016-78742-C2-2-R para la realización del trabajo presentado.