



# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A CORTANTE DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE POLIOLEFINA

**Álvaro PICAZO**

Máster en Técnicas y Sistemas en Edificación. Universidad Politécnica de Madrid.  
a.picazo@upm.es

**Marcos G. ALBERTI**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.  
marcos.garcia@upm.es

**Alejandro ENFEDAQUE**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.  
alejandro.enfedaque@upm.es

**Jaime C. GÁLVEZ**

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.  
jaime.galvez@upm.es

## **ABSTRACT**

*The concrete standards provide the contribution on the structural design of fibres randomly arranged in the matrix. They are based on the achievements developed in the years of use of this technique of reinforcement.*

*Polyolefin fibres are chemically stable and can be an alternative to steel fibres since they can reach similar results on residual stress, in addition to doing so with a lower dosage in weight. There is a lack on polyolefin fibres research and the interesting possibility of replace partially or totally the stirrups by using polyolefin fibres reinforcement. Fracture Mode II tests have been complemented with a digital image correlation system allowed to display the different forms of failure of the specimens. This research provides significant information about the contribution of polyolefin fibres to shear, allowing also a comparison with the design requirements.*

## **RESUMEN**

*La normativa de hormigón contempla la contribución en el diseño estructural de las fibras aleatoriamente dispuestas en la matriz, tras las realizaciones que se han desarrollado en los*

años de empleo de esta técnica de refuerzo.

Las fibras de poliolefina, químicamente estables, han mostrado que pueden ser una alternativa a las fibras de acero ya que pueden conseguir resultados similares de tensiones residuales, además de hacerlo con una dosificación inferior en peso.

Debido a que existe una escasa investigación al respecto de las fibras de poliolefina y a la interesante posibilidad de sustituir parcial o totalmente la armadura de estribos por el refuerzo mediante fibras de poliolefina, se ha llevado a cabo este estudio. Se han realizado ensayos de fractura en modo II complementados con un sistema de vídeo-extensometría que permitió visualizar las diferentes formas de fallo de las probetas. Esta investigación aporta una importante información sobre la contribución de las fibras de poliolefina a la resistencia a esfuerzo cortante, permitiendo además una comparación con los requisitos de diseño exigidos por la normativa.

**Palabras clave:** Fibre reinforced concrete, shear strength, polyolefin fibre, digital image correlation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La unión del hormigón y barras de acero ha sido, desde hace mucho tiempo, una solución magnífica para la ejecución de estructuras. Esta solución posee ventajas económicas y excelentes cualidades mecánicas si se la compara con otros materiales [1]. Como características, se puede indicar que el hormigón sin reforzar tiene una buena resistencia a compresión pero, por contra, presenta una reducida resistencia a tracción, elevada fragilidad y baja ductilidad [2], pudiendo producirse fallos súbitos. Estas carencias en el hormigón han motivado el desarrollo de técnicas de refuerzo que doten al hormigón de las carencias que presenta. Tradicionalmente se ha reforzado el hormigón con acero y, más actualmente, se está desarrollando el hormigón reforzado con fibras. Estas fibras aleatoriamente dispuestas en su matriz pueden ser de diversos materiales; acero, vidrio, acrílicas, carbono, poliéster, polipropileno, etc.

Esta técnica de refuerzo del hormigón nació en el siglo XX mediante la inclusión

de fibras en la matriz del hormigón [3]. Desde ese momento se han desarrollado un número importante de investigaciones en torno a esta técnica. Uno de los últimos tipos de fibras introducidas en el mercado han sido las fibras de poliolefina, por lo que los conocimientos y la experiencia práctica sobre ellas son inferiores a los existentes sobre fibras de acero, que han sido las más utilizadas. El uso de estas fibras sintéticas ha demostrado ser una alternativa seria frente a las fibras de acero, aportando importantes resistencias residuales y mejorando vez los sistemas de producción y puesta en obra [4]. Estas fibras están aceptadas con carácter estructural dentro de las normativas actualmente vigentes, como el Código Modelo y la EHE-08 [5, 6]. Por todo lo reseñado se puede concluir que existe un creciente interés en conocer sus propiedades mecánicas.

Varias realizaciones han demostrado que los hormigones reforzados con fibras (HRF) son apropiados en elementos estructurales [7, 8]. Por tanto se puede contar con la contribución estructural de



las fibras, siempre que se cumplan los requisitos indicados en las diferentes normativas. Esta contribución del HRF permite sustituir total o parcialmente el refuerzo tradicional de barras de acero.

A día de hoy las fibras de acero y las de poliolefina están consideradas como fibras estructurales. Para lograr esta característica estructural las normas exigen ciertos valores de resistencia residual. Estos valores exigidos de resistencia a la tracción por flexión han sido estudiados anteriormente tanto en los HRF de acero (HRFA) y en los de poliolefina (HRFP) [9, 10]. Pero además, la posible inclusión del carácter estructural de las fibras requiere también conocer otras características, como puede ser la contribución a cortante de las mismas. Es en este punto donde todavía existen ciertas incógnitas en relación al comportamiento en fractura en Modo II de los HRF.

Pese a que las investigaciones llevadas a cabo para conocer el comportamiento en fractura del hormigón en modo II son amplias y variadas, todavía existen dudas en la forma de cuantificar los diferentes mecanismos resistentes del hormigón a cortante. En este punto cabe recordar los mecanismos que se movilizan en un elemento de hormigón fisurado sometido a esfuerzo cortante: 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) [11].

También es reseñable indicar que si se compara el hormigón armado tradicional con cercos frente a los HRF, los hormigones fibro-reforzados tienen una menor tenacidad y resistencia a cortante [12]. Por el contrario, la abertura de fisura en los HRF es más reducida que en los hormigones convencionales. El puente generado por las fibras del hormigón impide la abertura de la fisura, por lo que el efecto de engranamiento de los áridos es siempre superior en los hormigones con fibras.

## 2. FINALIDAD DEL ESTUDIO

La principal finalidad de este estudio fue analizar el comportamiento a cortante del HRFP. Para ello se realizó una campaña de ensayos tipo "push-off" [13]. Este ensayo, como se muestra en la Figura 1, se realiza con probetas de pequeñas dimensiones, determinándose la carga aplicada, la abertura de las entallas y el desplazamiento a cortante. Mediante estos parámetros se pueden obtener las tensiones promedio, lo que permite comparar entre sí los diferentes tipos de hormigón. También se puede obtener la tensión de rotura y la energía de fractura. Se puede definir geoméricamente a la probeta para los ensayos tipo "push-off" como un prisma con dos entallas que forman una sección de ligamento en el centro de la misma, sobre la cual se aplica la carga, generando esfuerzos de cortante.

Para estudiar de manera adecuada el comportamiento de elementos estructurales debe ser posible medir las deformaciones que se producen en éstos cuando se les somete a diferentes sollicitaciones. De esta manera se puede conocer la relación entre las cargas

aplicadas y las deformaciones producidas, pudiéndose definir las propiedades mecánicas del material. En el caso de materiales con comportamiento frágil es de gran interés complementar los instrumentos convencionales de medida durante el ensayo con otras técnicas que permitan visualizar su comportamiento en fractura. La técnica de video-extensometría [14] permite obtener estos resultados mediante el registro del mapa de deformaciones de la superficie de una probeta generado durante un ensayo mecánico.

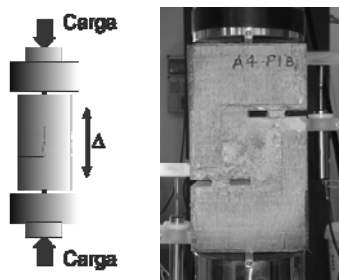


Figura 1: Ensayo "push-off".

Para llevar a cabo este estudio se emplearon medias probetas de hormigón procedentes de ensayos previos a flexión en tres puntos. Se conocían sus características en estado fresco y endurecido y se emplearon probetas de HRFP con cuantías de 6, 7,5 y 10 kg/m<sup>3</sup>. El hormigón con 6 y 7,5 kg/m<sup>3</sup> de fibras tuvo una resistencia a compresión baja (BR, con  $f_{cm} \cong 21$  MPa), en tanto que los de 10 kg/m<sup>3</sup> tuvieron una matriz con la misma composición, uno vibrado (V, con  $f_{cm} \cong 40$  MPa), y otro autocompactante (AC, con  $f_{cm} \cong 51$  MPa). Las propiedades mecánicas pueden verse con mayor detalle en las referencias [15]. Se

consiguió obtener información relevante respecto del instante en el que se produce la fisuración y además se registró la pérdida de la rigidez de las probetas. Con la información obtenida también se obtuvieron las curvas que muestran el comportamiento post-fisuración de los HRFP.

### 3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Las probetas para la ejecución de la campaña experimental se obtuvieron a partir de las mitades resultantes de los ensayos previos de resistencia a la tracción por flexión con probetas entalladas de los diferentes tipos de hormigón, según se muestra en la Figura 2. El daño en los ensayos de flexión se localiza en la zona cercana a la sección central entallada, por lo que el resto de la probeta se puede considerar que no ha estado sometida a esfuerzos previos que hayan reducido la capacidad mecánica del material.

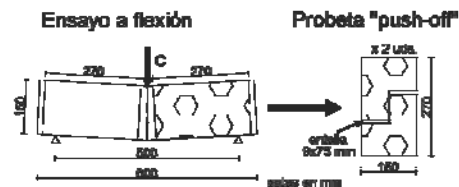


Figura 2: Obtención de probetas.

Se mecanizaron probetas prismáticas de 270x150x150 mm<sup>3</sup>, en las cuales se realizaron dos entallas de 75 mm de profundidad y 9 mm de altura en dos lados opuestos. Con el fin de medir la abertura de las entallas durante los ensayos se dispusieron dos LVDT (linear variable differential transformers), según



se puede apreciar en la Figura 1, que permitieron medir el movimiento relativo entre entallas y detectar cualquier posible rotación de la probeta durante el ensayo. El ensayo fue complementado con un sistema de vídeo-extensometría, que permitió registrar la aparición y desarrollo de las fisuras en la probeta a lo largo del mismo.

Las probetas fueron ensayadas en una máquina Instron® 8803 con capacidad máxima de carga de 500 KN. Para aplicar la carga sobre las probetas se emplearon dos barras de acero de sección cuadrada de 10 mm de lado, colocadas encima y debajo de la probeta con el fin de concentrar las tensiones en el ligamento entre entallas. Fue muy importante la colocación correcta de las probetas y sus barras de carga; las barras de carga y las puntas de las entallas tenían que coincidir en un mismo plano vertical. Para lograr esta correcta alineación se usó un nivel láser. Los ensayos fueron controlados mediante el desplazamiento del actuador, a una velocidad constante de una micra por segundo.

#### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 1 se muestran resultados obtenidos en los ensayos. Se indican, para cada tipo de hormigón, el número de probetas ensayadas, la media de la tensión máxima a cortante y el número de fibras contadas en la sección resistente. Todos los valores se acompañan de sus respectivos coeficientes de variación, entre paréntesis.

Con el fin de poder comparar los comportamientos de los diferentes hormigones se ha empleado el valor de la tensión media a cortante, obtenida según

la ecuación (1).

$$\bar{\tau}_{med} = C / s \quad (1)$$

Siendo C (kN) la carga aplicada y s (mm<sup>2</sup>) la sección de ligamento.

**Tabla 1:** Valores de la media de la tensión máxima, número medio de fibras en la sección resistente y número de probetas ensayadas. Los valores se acompañan de su correspondiente coeficiente de variación.

	$\tau_k$ (MPa)	Fibras (ud)	Nº probetas
HRFP BR 6	5,19 (0,09)	47 (0,11)	4
HRFP BR 7,5	4,93 (0,14)	67 (0,29)	4
HRFP AC 10	9,70 (0,01)	57 (0,20)	3
HRFP V 10	7,93 (0,08)	67 (0,02)	2

Si hacemos un gráfico con los valores de tensión media a cortante frente a desplazamiento cortante, obtenemos la imagen de la Figura 3. En ella se puede observar que los diferentes hormigones tienen una rama ascendente lineal, asociada a la resistencia de la matriz de hormigón. Respecto al comportamiento a cortante de los HRFP de 6 y 7,5 kg/m<sup>3</sup> se observó un comportamiento muy parejo, pudiendo concluir que el pequeño aumento de dosificación de fibras, con la misma matriz de hormigón, no varía la resistencia a cortante. De manera análoga se puede indicar que sucede lo mismo en el caso de los dos HRFP con 10 kg/m<sup>3</sup>.

Mirando con detalle la Figura 3, se pueden observar los diferentes comportamientos durante la rama de descarga. Si hablamos de los HRFP con 6 y 7,5 kg/m<sup>3</sup> de fibras de poliolefina, vemos que se produce un

comportamiento muy dúctil tras el fallo de la probeta, con una pérdida de carga muy poco pronunciada manteniéndose la descarga suave hasta la finalización de los ensayos. Al analizar las probetas con 10 kg/m<sup>3</sup>, tras el fallo inicial del elemento, se produce una rama de descarga mucho más pronunciada que en el caso de los HRFP con menos cuantía de fibras. Esta rama de descarga se convierte, en la tercera fase del ensayo, en una rama de descarga suave, manteniéndose ese comportamiento hasta desplazamientos a cortante de más de 5 mm.

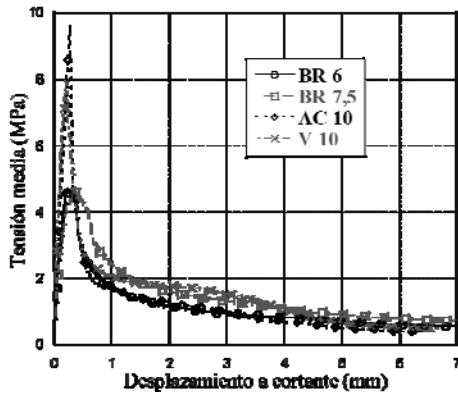


Figura 3: Gráfica tensión media a cortante – Desplazamiento a cortante.

También resulta relevante indicar la tenacidad de los elementos estudiados. Una vez obtenidas las curvas tensión–desplazamiento, se calculó la energía disipada por los hormigones. En la Tabla 2 se muestran los resultados medios de todos los hormigones ensayados. Además, también se incluyen las tensiones tangenciales que mantienen los HRFP para diversos desplazamientos.

Tabla 2: Energía disipada hasta 6mm de desplazamiento a cortante y resistencias residuales para desplazamientos de 2,5 y 3,5 mm.

	$G_F$ (N/m)	$\tau_k$ 2,5mm (MPa)	$\tau_k$ 3,5mm (MPa)
HRFP BR 6	7621	1,04	0,9
HRFP BR 7,5	9834	1,44	1,21
HRFP AC 10	7913	1,15	0,83
HRFP V 10	9899	1,7	1,34

## 5. VÍDEO-EXTENSOMETRÍA

Los mecanismos de fractura en modo II que tienen lugar en los ensayos “push-off” se estudiaron con un sistema de vídeo-extensometría. Los ensayos fueron grabados con dos cámaras de alta definición a un fotograma por segundo, lo que permitió sincronizar los datos de la máquina de ensayo con la vídeo-extensometría y correlacionar las imágenes, cargas y desplazamientos. Esta asociación de datos permitió obtener, para un instante dado, la carga aplicada a la probeta y el mapa de deformaciones.

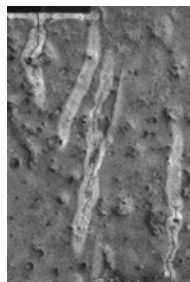
Respecto al análisis de los HRFP BR 6 y 7,5 kg/m<sup>3</sup>; las fisuras se generaron en la punta de la entalla superior o inferior. Desde ese momento crecieron en dos direcciones, una vertical entre las puntas de las entallas y otra, en pequeñas fisuras, con una cierta inclinación. Esto puede verse en la Figura 4. En este caso, la fisura arrancó en la punta de la entalla inferior y progresó hacia la punta de la superior.

En el caso de los HRFP con 10 kg/m<sup>3</sup> de fibras, los patrones de fisuración

resultaron muy similares. Las fisuras aparecieron a lo largo de la sección del ligamento, produciéndose igualmente fisuras a flexión en la zona central de las entallas. Estas fisuras de flexión se reducen hasta resultar imperceptibles por el sistema de vídeo-extensometría. La Figura 5 muestra el momento de la aparición de las fisuras iniciales.



**Figura 4:** Probeta HRFP BR 6 en el momento de su fisuración.



**Figura 5:** Probeta HRFP V 10 en el momento de aparición de las fisuras.

## 6. CONCLUSIONES

La campaña experimental permitió obtener un diseño válido de ensayos de fractura en Modo II de HRFP. Se emplearon probetas obtenidas de las mitades restantes de los ensayos de

resistencia a la flexión en tres puntos. La combinación de los ensayos a Modo I y II permitió un análisis exhaustivo del comportamiento mecánico del material.

Los valores máximos de las tensiones a cortante se asociaron a las propiedades de la matriz del HRFP. Los valores de las tensiones residuales a cortante se relacionaron con la dosificación de las fibras. Los datos obtenidos de la resistencia a cortante de los HRF plantean la posibilidad de la sustitución del refuerzo a cortante mediante cercos por HRF.

El comportamiento de los HRF a cortante mostró unos procesos de fractura con apreciable ductilidad, mejorando en gran medida a la del hormigón sin fibras. Los ensayos mostraron que se pueden producir valores elevados de desplazamiento a cortante sin el colapso del material gracias a la aportación de las fibras.

Por último, cabe señalar que el uso de la técnica de vídeo-extensometría permite visualizar los patrones de fisuración.

## 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.

## 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. 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.
- [4] 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.
- [5] International Federation for Structural Concrete (fib), *The fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Lausanne, Switzerland: International Federation for Structural Concrete, 2010.
- [6] Spanish Minister of Public Works, *Spanish Structural Concrete Code EHE-08*. Madrid, Spain: Spanish Minister of Public Works, 2008.
- [7] 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, no. 4, pp. 342-361, 2013.
- [8] M. G. Alberti, A. Enfedaque, J. C. Gálvez, and V. Agrawal, "Reliability of polyolefin fibre reinforced concrete beyond laboratory sizes and construction procedures," *Composite Structures*, vol. 140, pp. 506-524, 2016.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] H. P. Taylor, "The fundamental behavior of reinforced concrete beams in bending and shear," *Special Publication*, vol. 42, pp. 43-78, 1974.
- [12] J. Turmo, N. Banthia, R. Gettu, and B. Barragán, "Study of the shear behaviour of fibre reinforced concrete beams," *Materiales de construcción*, vol. 58, no. 292, pp. 5-13, 2008.
- [13] J. Echegaray, "Upgrading the push-off test to analyze the contribution of steel fiber on shear transfer mechanisms," 2014.
- [14] 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.
- [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, 8/30/ 2018.