

Efecto tamaño en hormigón reforzado con fibras de poliolefina basado en ensayos a flexotracción

Size effect on bending test of polyolefin fibre-reinforced concrete

Álvaro Picazo Iranzo^{*,a}, Marcos García Alberti^b, Jaime C. Gálvez Ruiz^b, Alejandro Enfedaque Díaz^b y Abner C. Vega^c

^a Prof. Máster en Técnicas y Sistemas en Edificación. Departamento de Tecnología de la Edificación, E.T.S. de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid, España. a.picazo@upm.es

^b Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España. marcos.garcia@upm.es, jaime.galvez@upm.es, alejandro.enfedaque@upm.es

^c Máster en Ingeniería de las Estructuras, Cimentaciones y Materiales. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España. abnrcivil@gmail.com

RESUMEN

La utilización de fibras de poliolefina como material de refuerzo del hormigón se ha convertido en una alternativa atractiva. Sin embargo, investigaciones anteriores mostraron una falta de consenso a la hora de evaluar el efecto tamaño en el hormigón reforzado con fibras. Así, este estudio analiza el comportamiento en fractura del hormigón reforzado con fibras de poliolefina utilizando tres tamaños homotéticos de probetas. Los resultados mostraron cómo las resistencias disminuyeron en piezas de mayores dimensiones a igualdad de fibras en la sección resistente.

ABSTRACT

The use of polyolefin fibres to reinforce concrete structures has become an attractive alternative. However, previous research showed a lack of consensus in assessing the size effect on fibre reinforced concrete. Thus, this study analyses the fracture behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete through use of three homothetic size specimens. The results showed how the tensile strengths decreased in larger specimens for equality of fibres in the resisting section.

PALABRAS CLAVE: efecto tamaño, hormigón reforzado con fibras de poliolefina, ensayos a flexotracción.

KEYWORDS: size effect, polyolefin fibre reinforced concrete, bending tests.

1. Introducción

Para mejorar su baja resistencia a tracción y dotarle de ductilidad, el hormigón es normalmente reforzado mediante barras de acero o, más recientemente, con fibras aleatoriamente dispuestas en su masa. Esta última técnica, conocida como hormigón reforzado con fibras (HRF) reduce la fisuración por retracción [1], además de permitir la

sustitución parcial o total de las barras de armado al tener en cuenta la contribución resistente [2, 3].

Las fibras que actualmente más se emplean en elementos estructurales son de acero o poliolefina, utilizándose las primeras desde mediados del siglo XX [4], en tanto que las segundas aparecieron en la década de los 90. Por

tanto, las investigaciones y aplicaciones sobre hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) son mucho más extensas que las de fibras de poliolefina (HRFP). Esto conlleva una falta de conocimiento sobre algunas de las propiedades mecánicas del HRFP.

Además, un problema al que se enfrenta la relación entre la investigación y el uso real de nuevas técnicas es que no siempre es posible aplicar la misma formulación en ensayos y en elementos estructurales. Así, en materiales cuasi-frágiles se ha observado que a medida que aumenta el tamaño de un elemento estructural, la tensión máxima que soporta disminuye [5]. Este fenómeno es conocido como efecto tamaño y existen tres teorías para su estudio: la estadística, la de fractales [6] y la más empleada, la determinista [7].

En la literatura científica está aceptada la existencia del efecto tamaño. Sin embargo, no existe unanimidad a la hora de cuantificarlo al hablar de HRF. Se realizaron estudios sobre la influencia del tamaño máximo del árido y de la fracción volumétrica de las fibras que muestran la presencia de efecto tamaño en este hormigón [8]. Otras investigaciones, llevadas a cabo con fibras de acero, indicaron que el efecto tamaño no es apreciable [9]. Concluyeron que una fracción volumétrica de fibras elevada disminuye el efecto tamaño debido al incremento de ductilidad [10]. Un último estudio determinó que el efecto tamaño es más importante en el hormigón de alta resistencia [11].

Así, esta falta de unanimidad a la hora de contemplar el efecto tamaño en el HRF motiva el presente estudio, en el cual se han analizado las resistencias residuales aportadas por las fibras de refuerzo. Estas resistencias son función a su vez de varios factores que se han tenido en consideración: interacción fibra-hormigón, orientación y distribución de las fibras [12, 13].

Para realizar este trabajo se ha fabricado un hormigón autocompactante [14] reforzado con una fracción volumétrica de fibras del 1,1% (10 kg/m³). Se utilizaron fibras de poliolefina, con una longitud de 48 mm. Con este HRFP se

realizaron probetas, y se entallaron, de tres tamaños diferentes, manteniendo las proporciones, que se ensayaron a flexión en tres puntos. Se constató la existencia de efecto tamaño en el hormigón fibro-reforzado a la vez que se observó un descenso en la resistencia residual en probetas de mayores dimensiones, a igualdad de fibras en la sección de ligamento.

2. Programa experimental

Se realizaron tres tamaños diferentes de probetas elaboradas con hormigón autocompactante fibro-reforzado con 10 kg/m³ de fibras de poliolefina de 48 mm de longitud. Las probetas guardaron proporcionalidad entre sus dimensiones, en relación a su altura. La diversidad en dimensiones y cantidad de probetas permitió obtener datos suficientes para elaborar un correcto análisis de resultados. La Figura 1 muestra los tamaños de las probetas realizadas.

2.1 Materiales y fabricación de probetas

La dosificación empleada se muestra en la Tabla 1 y los materiales empleados fueron los especificados en [14]. Las macro-fibras eran SikaFiber® PF48, de 48 mm de longitud y acabado superficial rugoso, empleadas en una fracción volumétrica de 1.1%. Su densidad es de 0.91 g/cm³ y su esbeltez de 53.

El hormigón se elaboró en una hormigonera de 100 l de eje vertical. Primero se mezclaron los tres tipos de áridos durante un minuto y se añadió 1/3 de las fibras, mezclándose otros treinta segundos.

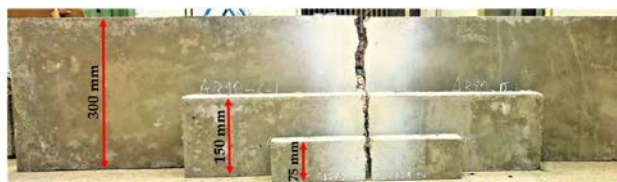


Figura 1. Relación visual entre los tres tamaños de probeta empleados en el estudio.

Posteriormente, se añadió el cemento junto con el filler, homogeneizándolo durante medio minuto, y se añadió otro tercio de fibras, amasándose treinta segundos más. Se incluyó el 75% del agua y se mezcló un minuto para añadir después el resto de fibras y agua con superplastificante, procediendo al amasado final durante 150 segundos, reposando otros 150 y realizándose una mezcla final de dos minutos.

Tabla 1. Dosificación del hormigón

Material	kg/m ³
Cemento CEM I 52.5 R	375
Agua	187.5
a/c	0.50
Arena	918
Gravilla	245
Grava	367
Filler calizo	200
Superplastificante	1.25 (% cemento)
Fibras PF48	10.0
Compactación	Auto-compactante

Se realizó el ensayo de escurrimiento [15], que dio como resultado medio de dos ensayos un valor de $t_{500} = 6$ s y un $d_m = 570$ mm. Los moldes metálicos fueron llenados desde uno de sus extremos hacia su lado opuesto realizándose la compactación por la única acción del peso propio del hormigón [12, 16]. Las probetas se cubrieron con material plástico para evitar la deshidratación del material, fueron desmoldadas a las 24 horas después de su hormigonado y curadas en cámara húmeda a 20°C y 90% de humedad durante un mínimo de 28 días hasta el momento de ser ensayadas.

Tras ese proceso, se realizó la entalla central mediante una máquina de corte de baja velocidad equipada con disco de diamante por vía húmeda, manteniendo en todos los casos una altura de ligamento igual a la mitad del canto total de la probeta. De esta manera se realizaron probetas de tres tamaños que mantuvieron su relación de proporcionalidad entre dimensiones basada en el canto de la probeta. En la Tabla 2 se indican las

dimensiones de los tres tamaños obtenidos: grande, mediano y pequeño así como el número de probetas válidas ensayadas.

Tabla 2. Dimensiones (mm) y número de probetas ensayadas

Tamaño	Grande	Mediano	Pequeño
Longitud	1350	675	340
Espesor	50	50	50
Altura	300	150	75
Entalla	150.0	75.0	37.5
Unidades	3	2	3

2.2 Realización de los ensayos

Elaboradas las probetas, se procedió a medirlas y marcar en ellas la correcta ubicación de los puntos de apoyo y del cilindro de carga. Se pintaron con un patrón de puntos monocromo aleatorio [17] las zonas superiores de las entallas de las probetas, en ambas caras. Este patrón es necesario para poder obtener, mediante un sistema de vídeo-extensometría, datos de la generación de las fisuras y su posterior crecimiento. Se siguió el método de ensayo a flexión [16], donde la luz entre apoyos fue de tres veces la altura de la probeta. En la Figura 2 se muestra una probeta preparada para su ensayo.

Para realizar los ensayos se contó con una máquina servo-hidráulica de 500 kN de capacidad máxima, a la que se acopló una célula de carga de 25 kN. Para medir la abertura de fisura se dispuso de un transductor (CMOD) con un rango de hasta 8 mm y para obtener la flecha de las probetas se utilizaron dos transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) con 30 mm de recorrido, colocando uno a cada lado de éstas y obteniendo el valor medio del descenso de manera analítica.

Por último, se complementó la forma de medida tradicional con dos cámaras de alta definición, de cinco megapíxeles, que monitorizaron la zona de aparición de fisura en la cara anterior y posterior de las probetas. La grabación se realizó a una velocidad de un



Figura 2. Probeta preparada para ser ensayada a flexión en tres puntos.

fotograma por segundo, para conseguir sincronizar los valores facilitados por la prensa con los de la grabación.

El control del ensayo se realizó con el desplazamiento del actuador de la máquina. En un primer paso, hasta un descenso de 0.6 mm, la velocidad del actuador fue de 0.0425 mm/min y en un segundo paso la velocidad fue de 0.17 mm/min. En todos los casos, la formación de la fisura apareció durante el primer paso.

La posición y orientación de las fibras en la matriz de hormigón juega un papel determinante en las características resistentes de los elementos [18]. Por ello, se procedió al conteo de las fibras existentes en la sección resistente, dividiendo dicha sección en ocho zonas. El efecto pared se consideró en un ancho igual a la mitad de la longitud de la fibra: 24 mm.

3. Resultados

Los datos obtenidos durante los ensayos fueron: tiempo, carga, desplazamiento del actuador, abertura de la entalla, flecha en la probeta y vídeos con la aparición y desarrollo de las fisuras. Con ellos y el análisis de la superficie de la fractura se analizaron los resultados obtenidos. Se muestran resultados relevantes donde se relacionó la fuerza y tensión producida en los ensayos con la deformación y abertura de la fisura, las relaciones entre la superficie de fractura, el tamaño de la probeta y el número y

distribución de las fibras.

Los resultados de tensión residual del HRF se expresan conforme a la ecuación (1), donde F_j es la carga aplicada, L la luz entre apoyos, b el ancho de la probeta y h_p la altura de ligamento.

$$F_{Rj} = \frac{3F_j L}{2bh_p^2} \quad (1)$$

3.1 Comportamiento a fractura

En la Figura 3 se muestra la relación entre la fuerza en el ensayo frente a la abertura de los labios de la entalla (CMOD), donde aparecen las curvas con el comportamiento medio de los tres tamaños de probeta ensayados. Se aprecia que existen dos puntos de inflexión notables, definidos por el cambio de tendencia que tuvo lugar durante el ensayo. Al inicio se puede ver una rama de carga muy pronunciada hasta alcanzar la fuerza máxima. En esta rama la sección de ligamento permanece prácticamente inalterada. El primer punto de inflexión coincide con la fisuración de la sección resistente, momento a partir del cual se produce un descenso brusco de carga hasta llegar a un mínimo, el segundo punto de inflexión, donde

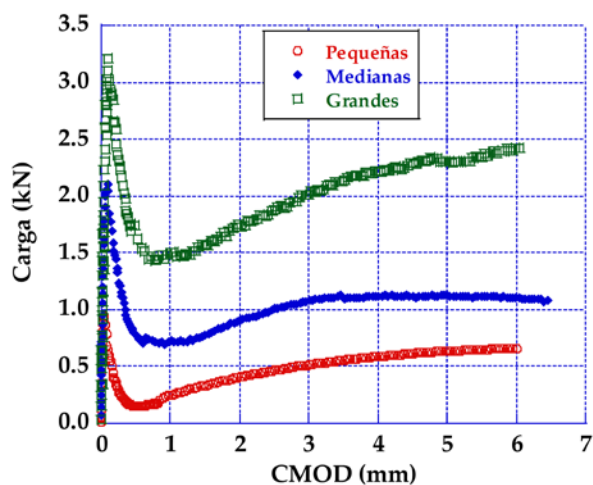


Figura 3. Gráfica de los valores medios fuerza-CMOD de los tres tamaños de probeta ensayados.

las fibras empiezan a trabajar.

En el caso de las probetas medianas se aprecia un tercer punto de inflexión en la gráfica, para un valor de CMOD de unos 4.5 mm, a partir del cual la carga residual vuelve a disminuir. Este comportamiento es el esperado en un HRFP [19].

Es importante indicar que la rama de recarga se mantuvo activa hasta flechas de 5 mm y, además, para valores de flecha de 15 mm todas las probetas mantuvieron cargas residuales.

3.2 Análisis de la superficie de fractura

El factor de orientación (θ) se obtiene conforme a la ecuación (2), contando el número de fibras en la sección de fractura (n) y calculando el número teórico (th) de fibras que atraviesan la sección de ligamento. Este valor es el número de fibras que pueden ser contadas considerando un posicionamiento ideal de las fibras. En la ecuación (2), A_c es el área de la sección de ligamento, V_f la fracción volumétrica de las fibras y A_f el área de una fibra.

$$\theta = \frac{n}{th} = \frac{n \cdot A_f}{A_c \cdot V_f} \quad (2)$$

Para conocer el número de fibras en la sección de ligamento, las probetas ensayadas se dividieron en dos mitades, por la fisura, y se contaron las fibras existentes en cada media sección resistente. La Tabla 3 indica el número medio de fibras contadas en la sección de ligamento, con su correspondiente coeficiente de variación (c.v.) junto con el factor de orientación.

Este factor es una herramienta importante a la hora de analizar y predecir la fiabilidad del uso estructural del HRF. En este caso sus valores sobrepasan 0.60, valor esperado según los resultados aportados por la literatura científica [18, 20]. El efecto pared, en el caso de las probetas de tamaño pequeño, afectó en más de la mitad de la superficie de fractura. Por lo

tanto, esto incrementó el valor de θ en las probetas de tamaño pequeño en comparación con los otros dos tamaños.

Tabla 3. Número medio de fibras en la sección de ligamento, con su c.v., y factor de orientación global

Tamaño	Grande	Mediano	Pequeño
Fibras	178	106	57
c.v.	0.10	0.03	0.08
θ	0.63	0.62	0.72

Además, las probetas realizadas según [16] muestran mejoras en las zonas sin influencia del efecto pared de la sección de ligamento debido a que el flujo del hormigón autocompactante tiende a alinear las fibras perpendicularmente a la superficie de fractura. Esto ayuda a entender por qué el factor de orientación toma valores mayores que 0.60 [13]. Por otra parte, investigaciones previas [21] mostraron que una mayor distancia de vertido produce una mayor influencia en la orientación de las fibras debido al flujo [21]. Esto es, los valores del factor de orientación de las probetas de tamaño grande se espera que sean mayores que en las de tamaño mediano o pequeño. Sin embargo, el efecto pared de las probetas pequeñas es evidente, puesto que el valor de su θ fue de 0.72.

4. Discusión

Una vez que se han recopilado y procesado los datos, es necesario un análisis y discusión en profundidad para poder evaluar de manera adecuada el efecto tamaño en fractura en Modo I en el HRFP.

4.1 Efecto tamaño en las curvas tensión-abertura de fisura

Al comparar las tres gráficas medias tensión-CMOD correspondientes a los tres tamaños de probeta estudiados se aprecian claras diferencias de comportamiento. La tensión residual, obtenida mediante la ecuación (1), tiene en consideración el tamaño de la probeta en el cálculo de la tensión

en la fibra inferior de la sección de ligamento. Por tanto, la curva mostrada en la Figura 4 permite una comparación directa que no hubiera sido posible de otra manera. Todo ello resulta relevante, ya que permite la comparación de las resistencias residuales, como f_{R1} (CMOD 0,5 mm) y f_{R3} (CMOD 2,5 mm), que son los valores principales de tensión empleados en el cálculo estructural [22].

Empezando con la resistencia en el límite de proporcionalidad (f_{LOP}), correspondiente con el valor de fuerza máxima en el ensayo, la gráfica de las probetas de tamaño pequeño presenta un valor máximo mayor, en comparación con los otros tamaños. Los valores de f_{LOP} fueron de 5.86, 5.07 y 3.85 MPa, para los tamaños pequeño, mediano y grande, respectivamente. Por tanto, las probetas de tamaño pequeño experimentaron resistencias superiores en un 52.2% a las probetas más grandes, poniendo de manifiesto el efecto tamaño. En cierto sentido, se cumplió la ley clásica para hormigón: a mayor tamaño de probeta menor resistencia [5]. Este fenómeno es debido a que el f_{LOP} se encuentra gobernado por la matriz de hormigón.

La mayor inclinación de la primera rama de carga obtenida en los ensayos corresponde al tamaño pequeño, mostrando un comportamiento más rígido que el de los otros tamaños. Al final de la rama de descarga, para un valor de CMOD de 0.42 mm, las resistencias

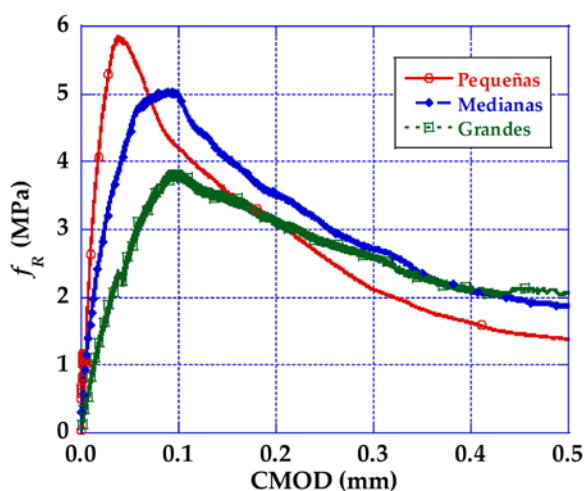


Figura 4. Curva tensiones-CMOD hasta una abertura de CMOD de 0.5 mm.

residuales mostraron valores similares y se encuentran dispuestas en el mismo orden que los tamaños de probeta, ya que la resistencia es soportada por las fibras.

El resto de tensiones residuales se comportaron en relación directa con el tamaño de la superficie de fractura, el número de fibras y el tamaño de la probeta. En la Figura 5 se pueden ver estas tendencias para los tres tamaños de probetas en relación al límite de proporcionalidad (f_{LOP}), resistencia mínima tras la rama de descarga (f_{MIN}) y las resistencias para los valores de CMOD de 0.5 y 2.5 mm (f_{R1} y f_{R3}) en relación al canto de la probeta “D”. Llegados a este punto, resulta necesario analizar el efecto del número de fibras y la orientación de las mismas para desacoplar ambos efectos del análisis en relación al efecto tamaño.

Para evaluar el efecto tamaño en el HRF, el análisis de las resistencias residuales es un punto clave. En la Figura 6 se muestra la gráfica de resistencia f_{R1} en relación al número de fibras contadas en la sección resistente. Se aprecia una clara tendencia al incremento de la pendiente en las probetas pequeñas y, contrariamente, un menor crecimiento de dicha pendiente en las probetas medianas y grandes. También se puede ver cómo las probetas pequeñas tienen mayor resistencia que las medianas y grandes. Como solamente se empleó una dosificación de fibras, el número de fibras en la sección de ligamento se

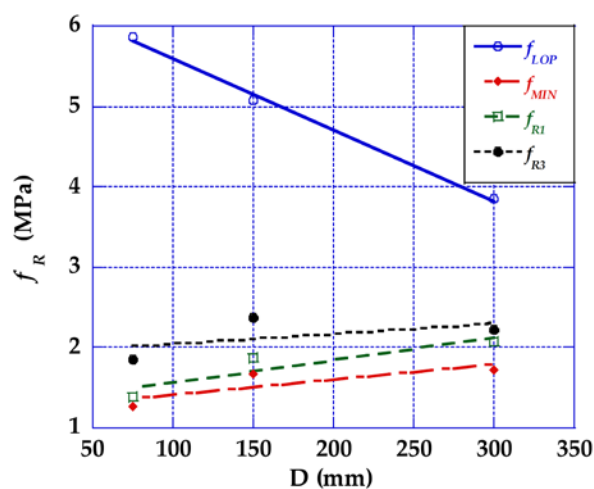


Figura 5. Valores medios de resistencias en relación al canto total de las probetas.

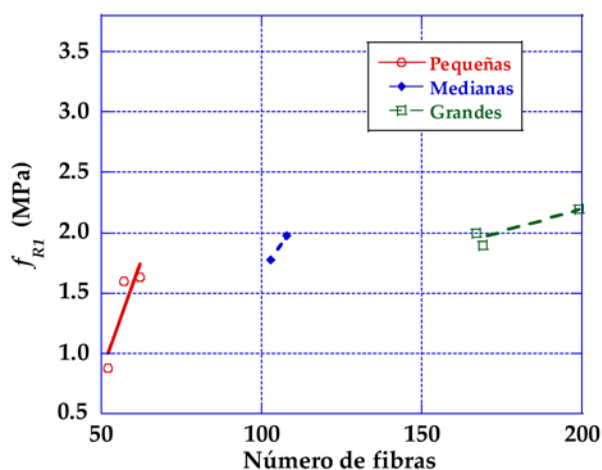


Figura 6. Línea de tendencia de la resistencia f_{RI} en relación al número de fibras para los tres tamaños de probetas.

encuentra influenciado por la sección resistente y por ende por el tamaño de las probetas. El comportamiento para la resistencia residual f_{R3} resultó similar aunque la inclinación de las tres rectas fue más pareja.

De esta manera, el análisis de la relación entre resistencias residuales y el número de fibras contadas confirma la existencia de efecto tamaño en el HRFP.

La Figura 7 analiza el efecto tamaño usando la gráfica de resistencia residual mínima (f_{MIN}) en relación al número de fibras, mediante la cual se aprecia un mejor comportamiento, en términos de resistencia, de las probetas de tamaño pequeño. Considerando los tres tamaños y ajustando las líneas a su paso por el origen de coordenadas, se puede apreciar la tendencia de cada tamaño. Así, para un número específico de fibras en la superficie de fractura la resistencia obtenida sigue la predicción esperada debido al efecto tamaño. En este sentido, el efecto tamaño existente se puede ver desacoplado la influencia de la distribución de las fibras en la superficie de fractura.

La resistencia residual en HRF está directamente relacionada con el número de fibras en la superficie de fractura [23]. La Figura 7 muestra que, para el mismo número de fibras existe un claro efecto tamaño. Considerando, por ejemplo, cincuenta fibras,

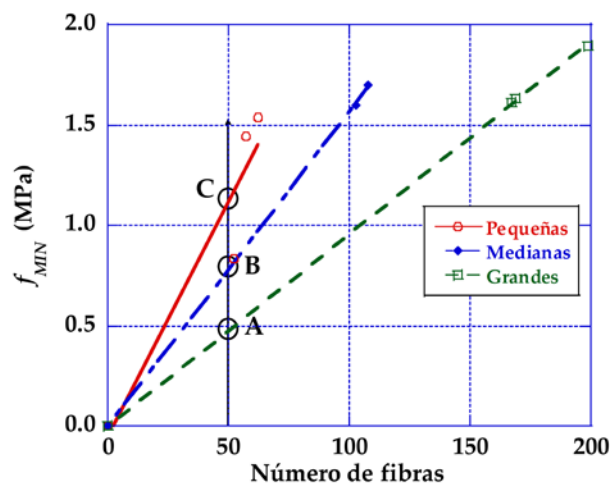


Figura 7. Líneas de ajuste de la relación entre f_{MIN} y el número de fibras.

la resistencia de las probetas de tamaño grande (punto A) se corresponde con un valor de 0.48 MPa, incrementándose este valor hasta 0.78 MPa (punto B) para las probetas de tamaño mediano y llegando hasta 1.11 MPa (punto C) para las probetas pequeñas. Este valor supone un incremento de un 231% de resistencia de las probetas pequeñas en relación a las grandes. Por tanto, este comportamiento confirma la influencia de efecto tamaño en el HRFP, no solo en los valores de resistencia dependientes de la matriz de hormigón (f_{LOP}), sino en los valores de resistencia post-fisuración (f_{MIN}), si tenemos en cuenta la aportación de cada fibra.

4.3 Vídeo-extensometría

La aparición y desarrollo de las fisuras se estudió mediante la técnica de vídeo-extensometría (VE). Esta técnica consiste en una correlación de imágenes sincronizadas con la máquina de ensayos que permite el uso de las imágenes para detectar los mapas de deformaciones y la aparición y desarrollo de fisuras. Para realizar el análisis mediante VE las imágenes se grabaron a una velocidad de un fotograma por segundo. Esta frecuencia permitió la sincronización de los datos obtenidos por las mediciones de la máquina de ensayos con los vídeos.

Como ya se indicó, los datos obtenidos por la máquina de ensayos fueron: carga, desplazamiento del actuador, abertura de CMOD, flechas de los LVDT y el tiempo de ensayo. Por lo tanto, el valor del tiempo es el mismo para el ensayo y la vídeo-extensometría, por lo que es posible la correlación de todos los datos. Este estudio permitió relacionar los valores de carga y desplazamiento generados por el actuador de la máquina con las imágenes de la generación, formación y desarrollo de las fisuras estableciendo como base el tiempo transcurrido de ensayo.

De esta forma se pudo visualizar, en todos los casos, que las grietas se produjeron en la parte superior de las entallas y fueron desarrollándose según una trayectoria vertical curva claramente influenciada por el efecto puente de las fibras. La Figura 8 muestra una imagen de la trayectoria de una fisura producida en los ensayos de flexión de este estudio.

Para mayor detalle, al respecto de este trabajo, puede consultarse [24].

5. Conclusiones

Se fabricaron probetas de tres tamaños, manteniendo la relación entre sus

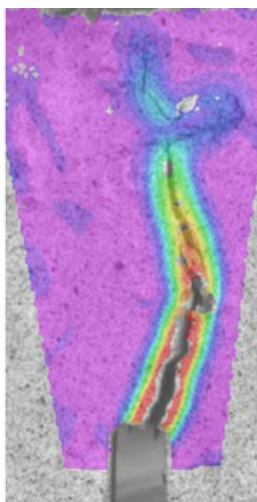


Figura 8. Fisura obtenida por vídeo-extensometría en una de las probetas durante su ensayo de flexión.

dimensiones, con objeto de estudiar el efecto tamaño en el hormigón reforzado con fibras de poliolefina sometido a ensayos de fractura a flexión. Los ensayos se realizaron acorde al procedimiento descrito en la norma EN-14651 [16], adaptándolo a las dimensiones de las probetas. Los sistemas de medición tradicional se complementaron con un sistema de vídeo-extensometría que permitió la observación de la generación y desarrollo de las fisuras.

Se comprobó que la resistencia en el límite de proporcionalidad está gobernado por las propiedades de la matriz de hormigón, mientras que las resistencias residuales post-fisuración fueron controladas por las fibras, siendo la sección resistente con el mayor número de fibras aquella con mayor resistencia.

Se observó que, en el límite de proporcionalidad, las probetas con una menor sección de fractura mostraron valores de resistencia mayores. Los valores de ese límite de proporcionalidad están gobernados por la matriz cementicia, por lo que los resultados concuerdan con la teoría clásica de efecto tamaño para hormigón.

Respecto de las resistencias residuales, el desacople de la resistencia y el número de fibras contadas en la sección de fractura mostró que el efecto tamaño es relevante. El menor valor de resistencia residual se obtuvo en probetas mayores, pero con similar número de fibras en la sección resistente. Esta conclusión puede ayudar al lector a examinar los resultados y conclusiones de investigaciones previas en relación al efecto tamaño en hormigón reforzado con fibras.

La técnica de vídeo-extensometría mostró que las fisuras se generaron en la zona superior de las entallas y que se desarrollaron hacia arriba siguiendo una trayectoria curva.

Agradecimientos

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

Igualmente los autores agradecen la

colaboración de las cátedras universidad-empresa: UPM-Sika y UPM-Madrid, Calle 30.

Referencias

- [1] N. Banthia and R. Gupta, "Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1263-1267, 2006.
- [2] Y. L. Voo, W. K. Poon, and S. J. Foster, "Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups," *Journal of structural engineering*, vol. 136, no. 11, pp. 1393-1400, 2010.
- [3] 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.
- [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.
- [5] Z. P. Bazant, J. Ožbolt, and R. Eligehausen, "Fracture size effect: review of evidence for concrete structures," *Journal of structural engineering*, vol. 120, no. 8, pp. 2377-2398, 1994.
- [6] A. Carpinteri and A. Spagnoli, "A fractal analysis of size effect on fatigue crack growth," *International journal of fatigue*, vol. 26, no. 2, pp. 125-133, 2004.
- [7] Z. P. Bazant, "Size effect in tensile and compression fracture of concrete structures: Computational modeling and design," *AEDIFICATIO Publishers, Fracture Mechanics of Concrete Structures*, vol. 3, pp. 1905-1922, 1998.
- [8] M. G. Alberti, A. Enfedaque, and J. C. Gálvez, "Improving the Reinforcement of Polyolefin Fiber Reinforced Concrete for Infrastructure Applications," *Fibers*, vol. 3, no. 4, pp. 504-522, 2015, doi: 10.3390/fib3040504.
- [9] G. H. Mahmud, Z. Yang, and A. M. Hassan, "Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) beams," *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 1027-1034, 2013.
- [10] D.-Y. Yoo, N. Banthia, J.-M. Yang, and Y.-S. Yoon, "Size effect in normal-and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams," *Construction and Building Materials*, vol. 121, pp. 676-685, 2016.
- [11] H. Cifuentes, "Análisis del comportamiento en fractura y del efecto de borde en hormigones de altas prestaciones reforzados con fibras de polipropileno," Ph. D. Thesis, Universidad de Sevilla, Sevilla, España. 2010.
- [12] M. G. Alberti, A. Enfedaque, J. C. Gálvez, and V. Agrawal, "Fibre distribution and orientation of macro-synthetic polyolefin fibre reinforced concrete elements," *Construction and Building Materials*, vol. 122, pp. 505-517, 2016.
- [13] M. Alberti, A. Enfedaque, and J. Gálvez, "A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibres for concrete," *Composites Part B: Engineering*, vol. 151, pp. 274-290, 2018.
- [14] 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.
- [15] C. European Committee for Standardization, "Testing Fresh Concrete. Part 8: Self-Compacting Concrete. Slump-Flow Test; EN12350-8," 2010.
- [16] C. European Committee for

- Standardization, "Test Method for Metallic Fiber Concrete. Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual); EN14651:2007+A1," 2007.
- [17] N. A. Hoult, W. A. Take, C. Lee, and M. Dutton, "Experimental accuracy of two dimensional strain measurements using digital image correlation," *Engineering Structures*, vol. 46, pp. 718-726, 2013.
- [18] M. G. Alberti, A. Enfedaque, and J. C. Gálvez, "On the prediction of the orientation factor and fibre distribution of steel and macro-synthetic fibres for fibre-reinforced concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 77, pp. 29-48, 2017.
- [19] M. G. Alberti, "Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete: From Material Behavior to Numerical and Design Considerations," Ph. D. Thesis, Technical University Madrid, Madrid, Spain., 2015.
- [20] F. Laranjeira, A. Aguado, C. Molins, S. Grünewald, J. Walraven, and S. Cavalaro, "Framework to predict the orientation of fibers in FRC: a novel philosophy," *Cement and Concrete Research*, vol. 42, no. 6, pp. 752-768, 2012.
- [21] 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.
- [22] Ministerio de Fomento, Instrucción de hormigón estructural. EHE-08. 2008.
- [23] 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.
- [24] Á. Picazo, M. G. Alberti, J. C. Gálvez, A. Enfedaque, and A. C. Vega, "The size effect on flexural fracture of polyolefin fibre-reinforced concrete," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 9, pp. 1762 -15 pages, 2019.