

Influencia de la longitud de microfibras de carbono en el comportamiento mecánico y de fractura de un hormigón de muy alta resistencia

Influence of Carbon Microfiber Length on the Mechanical and Fracture Behavior of Ultra-High-Performance Concrete

José D. Ríos Jiménez^a, Antonio Martínez de la Concha^b, Carlos Leiva Fernández^c y
Héctor Cifuentes Bulté^d

^a Dr. Ingeniero Industrial. Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Tª de Estructuras. Universidad de Sevilla. Profesor Permanente
Laboral. jdrios@us.es

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Tª de Estructuras. Universidad de Sevilla.
Profesor Contratado Doctor. deconcha@us.es

^c Dr. Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Dpto. Ingeniería Química y Ambiental. Catedrático de Universidad. cleiva@us.es

^d Dr. Ingeniero Industrial. Universidad de Sevilla. Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Tª de Estructuras. Catedrático de
Universidad. bulte@us.es

RESUMEN

En este estudio, se examinan las propiedades mecánicas y de fractura de un hormigón de muy alta resistencia reforzado con microfibras de carbono de distintas longitudes. Se analiza cómo la longitud de las fibras afecta a la porosidad y, en consecuencia, a las propiedades del hormigón. Utilizando tomografía computarizada y porosimetría, se observa la distribución de los poros y se relaciona con el comportamiento mecánico y de fractura del material. Los resultados muestran que las propiedades de fractura varían según la longitud y el contenido de las fibras de carbono.

ABSTRACT

In this study, the mechanical and fracture properties of ultra-high-performance concrete reinforced with carbon microfibers of different lengths are examined. The analysis focuses on how fiber length affects porosity and, consequently, the properties of the concrete. Using computed tomography and porosimetry, the distribution of pores is observed and related to the mechanical and fracture behavior of the material. The results show that fracture properties vary according to the length and content of the carbon fibers.

PALABRAS CLAVE: hormigón, fibras, carbono, fractura, porosidad, tomografía.

KEYWORDS: concrete, fibers, carbon, fracture, porosity, tomography.

1. Introducción

El hormigón de muy alta resistencia (HMAR) reforzado con fibras destaca por su baja relación agua-aglutinante y la integración de materiales de

tamaño de grano fino que promueven la hidratación y forman una estructura de baja porosidad [1]. Esta mayor densidad mejora la

durabilidad pero puede aumentar la fragilidad. Las fibras se incorporan para mejorar la ductilidad, absorción de energía y resistencia a la tracción. Aunque las fibras de acero aportan resistencia, presentan problemas como la corrosión y la expansión térmica, lo que ha llevado a investigar alternativas como las fibras de carbono (FCs), que ofrecen alta resistencia mecánica y mejor resistencia a altas temperaturas y a la corrosión. Las FCs, más ligeras y utilizadas en menores volúmenes que las fibras de acero, permiten estructuras más ligeras y ahorro de costos. La distribución homogénea de las FCs en la matriz del hormigón es esencial para optimizar sus características mecánicas y de fractura. La investigación ha demostrado que la integración de fibras puede modificar la estructura y distribución de los poros, impactando directamente en el rendimiento del hormigón.

Estudios previos han demostrado que la mezcla de fibras mejora significativamente la distribución, y el moldeo por vibración logra hormigones más densos [2]. La inclusión de fibras de carbono y nanomateriales ha sido transformadora, con aumentos en la resistencia a la tracción y mejoras en la arquitectura de los poros. La rugosidad de las fibras de carbono fortalece los enlaces fibra-matriz y aumenta la absorción de energía. Aunque la influencia de las nanofibras de carbono y las fibras de carbono en las características mecánicas del hormigón está bien documentada [3–5], la relación entre estas propiedades y la estructura porosa del hormigón sigue sin explorarse completamente. Este artículo presenta un análisis detallado del HMAR reforzado con FCs de diversas longitudes de fibra mediante escaneos de tomografía de rayos X y porosimetría de mercurio, centrándose en la resistencia al impacto del HMAR con FCs para avanzar en las aplicaciones tecnológicas del hormigón.

Este estudio realiza un análisis multiescala para entender cómo diversas microfibras de carbono refuerzan el HMAR. Se probaron muestras de HMAR reforzadas con fibras de

carbono de distintas longitudes para evaluar su resistencia mecánica y comportamiento de fractura. Los datos muestran cómo las modificaciones microestructurales, impulsadas por la integración de fibras, se traducen en cambios a nivel macro en la resistencia y durabilidad del hormigón.

2. Materiales y métodos

En este estudio, se emplearon cemento Portland Tipo I, humo de sílice y escoria granulada de alto horno molida como aglutinantes. Se añadieron dos tipos de áridos con tamaños de partícula que varían entre 800 y 40 μm . Para mejorar la manejabilidad de las mezclas frescas, se utilizó un superplastificante de éter policarboxílico de alta eficiencia, Viscocrete 20HE de SIKA.

Tabla 1. Componentes de la matriz y proporciones de la mezcla

Componente	HMAR (kg/m^3)
Cemento Tipo I 52.5 R/SR	540
Escoria granulada de alto horno molida	310
Humo de sílice	210
Arena de cuarzo gruesa (< 800 μm)	470
Arena de cuarzo fina (< 315 μm)	470
Superplastificante	42
Relación agua/cemento	0,38
Relación agua/aglutinante	0,19

En este estudio, se formularon todas las mezclas de HMAR con una matriz idéntica, utilizando tres tipos de fibras de carbono, FC-A, de entre 0,05 y 0,3 mm de longitud, FC-B, de 3 mm de longitud y FC-C, de 6 mm de longitud y cinco niveles de contenido de fibra (1,2; 3; 6; 15 y 20 kg/m^3). Los hormigones se detallan en la Tabla 1 y se utilizó una mezcla no reforzada como referencia. Las fibras tienen la misma resistencia a la tracción de 4200 MPa, con un módulo de Young de 230 GPa y un diámetro constante de 7 μm . Las mezclas se designan

como HMAR, seguido del tipo de fibra (A, B, o C) y el contenido de fibra.

3. Programa experimental

3.1 Ensayos mecánicos y de fractura

Para evaluar las propiedades mecánicas y de fractura, se moldearon especímenes prismáticos y cúbicos. La resistencia a la compresión se determinó según la norma EN 12390-3 [6]. El trabajo de fractura se midió mediante pruebas de flexión en tres puntos según la RILEM TCM-85 [7]. Se midieron la deflexión en el punto medio y el desplazamiento de apertura de la boca de la grieta. Se realizó un análisis inverso para obtener diagramas de ablandamiento por tensión bilineal examinando la ley cohesiva en dos segmentos: G_f y $G_F - G_f$ (ver Figura 1).

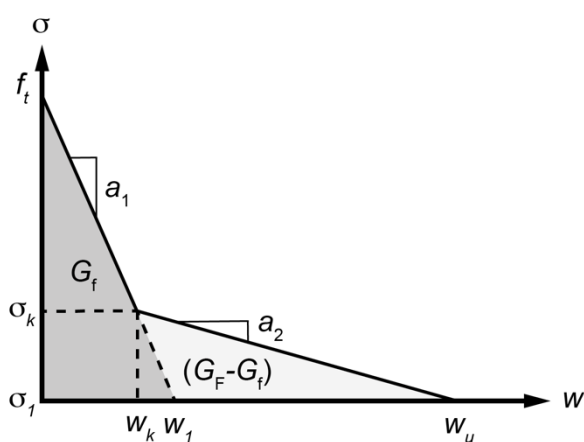


Figura 1. Ley cohesiva bilineal.

3.2 Tomografía de rayos X

Se utilizó la tomografía computarizada por rayos X para medir los macroporos formados por el aire atrapado durante la fabricación. Los exámenes se realizaron con el modelo Xradi 610 Versa de Zeiss en la Universidad de Sevilla, capaz de producir imágenes 2D y 3D con una magnificación máxima de 2000×. Las muestras analizadas fueron piezas de pruebas de flexión en tres puntos, seleccionadas para evitar la

influencia de la zona de fractura. Los resultados mostraron un tamaño de voxel de 35 μm en las tres direcciones cartesianas.

3.3 Porosimetría de mercurio

Se realizaron mediciones de presión utilizando un porosímetro de intrusión de mercurio, abarcando un rango de $1,02 \times 10^{-2}$ a $2,04 \times 10^2$ MPa y un tamaño de poro de 0.005 a 200 μm. Las muestras, en forma de pellets de 5 mm, se secaron a 105°C durante 48 horas y se analizaron por duplicado. Las muestras para las pruebas de porosimetría se extrajeron de la misma región que las utilizadas para el análisis de rayos X.

4. Resultados y discusión

4.1 Análisis de porosidad

El análisis de la porosidad acumulada y la distribución del tamaño de poro (Figura 2) se realizó en cuatro muestras: hormigón sin refuerzo y mezclas con fibras FC-A, FC-B y FC-C, todas con 6 kg/m³ de fibra. El hormigón sin refuerzo mostró la mayor porosidad acumulada (3,98% V/V) y el mayor tamaño de poro (2,73 mm), con un 75% de poros menores a 1,08 mm. HMAR-A-6 tuvo una porosidad acumulada de 2,22%, reduciendo la porosidad en el rango de 0,51-1,4 mm. HMAR-B-6 mostró una porosidad de 2,2%, con un aumento de poros entre 0,035-0,61 mm y mayores de 1.65 mm. HMAR-C-6 presentó la menor porosidad acumulada (2,1%), reduciendo los poros entre 0,035-1,02 mm y 1,42-1,68 mm.

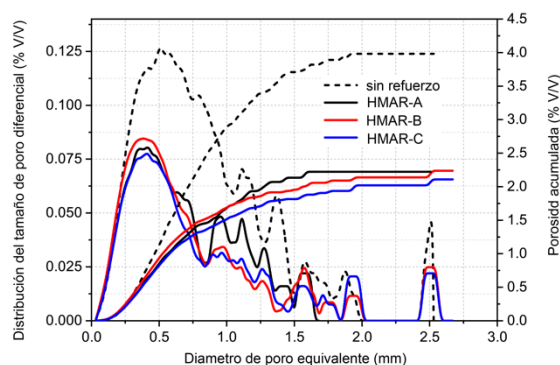


Figura 2. Distribución diferencial del tamaño de poro y porosidad acumulada.

4.2 Propiedades mecánicas y de fractura

Los valores medios de resistencia a la compresión para cada mezcla y contenido de fibra (Figura 3) muestran una tendencia ascendente hasta una concentración de 6 kg/m³. Sin embargo, al aumentar la concentración a 15 y 20 kg/m³, todas las mezclas presentan una reducción en su resistencia a la compresión media, aunque siguen siendo superiores a la resistencia del hormigón de referencia. Para estas concentraciones, las tendencias son más aleatorias según el tipo de fibra, debido principalmente a la baja trabajabilidad observada.

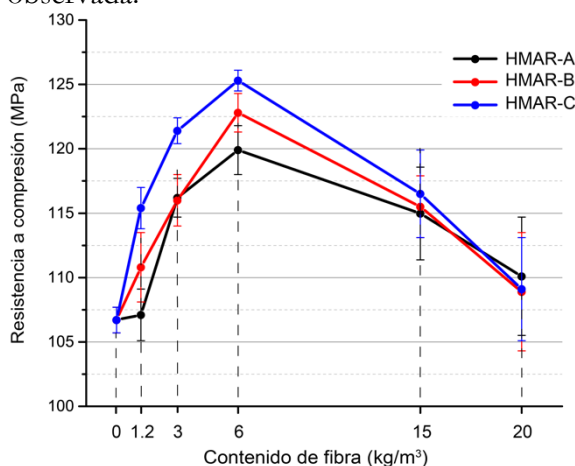


Figura 3. Resistencia a compresión de cada hormigón y contenido.

Con un contenido de fibra de carbono de 1,2 kg/m³, HMAR-C muestra la mayor resistencia a la compresión (8,2%), mientras que HMAR-A (0,4%) y HMAR-B (3,8%) tienen los resultados más bajos. La baja y aleatoria relación

de aspecto de las fibras en HMAR-A resulta en una costura ineficaz de las grietas. Al aumentar la relación de aspecto, HMAR-B mejora considerablemente.

Para un contenido de fibra de 3 kg/m³, HMAR-C sigue teniendo la mayor resistencia a la compresión (13,7%), mientras que HMAR-A y B tienen valores similares (alrededor del 9%). HMAR-A aumenta en un 8,6% respecto a 1.2 kg/m³, necesitando una mayor concentración de fibra para mostrar un aumento significativo.

Con 6 kg/m³ de fibra, HMAR-C y B tienen los valores más altos (17,4% y 15,0%, respectivamente). Esto demuestra que las fibras más cortas (FC-B) necesitan un mayor contenido de fibra para lograr mayores incrementos relativos en la resistencia a la compresión y obtener resultados similares a las fibras más largas. HMAR-B y C también muestran la menor porosidad acumulada total, contribuyendo a la mejora de la resistencia a la compresión.

Como puede verse en la Figura 4, la adición de 1,2 kg/m³ de fibras aumenta la resistencia a la tracción de HMAR-C (6 mm de longitud) en un 14% en comparación con el hormigón simple, debido a su mayor relación de aspecto. En contraste, HMAR-A (12-300 µm) y HMAR-B (3 mm) no mejoran significativamente para esta concentración.

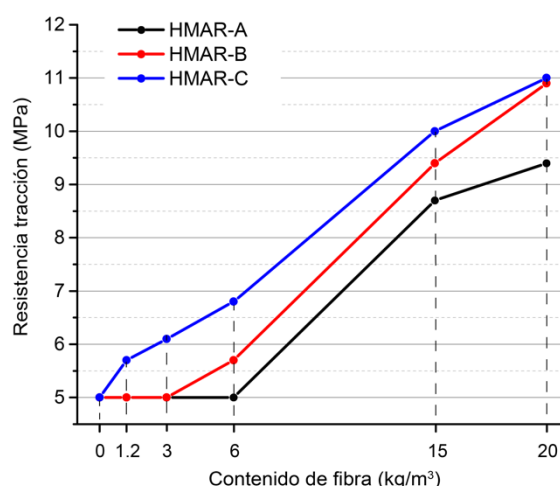


Figura 4. Resistencia a tracción de cada hormigón y contenido.

Para 3 kg/m³, HMAR-C muestra un aumento del 22% en la resistencia a la tracción,

mientras que HMAR-A y HMAR-B no muestran mejora. FC-A y FC-B necesitan compensar su menor relación de aspecto con un mayor número de fibras.

Con 6 kg/m³, HMAR-B aumenta la resistencia a la tracción en un 14%, dificultando la propagación de grietas. HMAR-C continúa aumentando (36%), mientras que HMAR-A no mejora. Las fibras de carbono reducen significativamente los macroporos, especialmente en HMAR-B y HMAR-C.

Para concentraciones de 15 y 20 kg/m³, todas las mezclas muestran un aumento en la resistencia a la tracción. HMAR-A tiene el mayor aumento relativo de 15 a 20 kg/m³ (64%). Las fibras más largas son más efectivas con menor cantidad de fibra utilizada. La resistencia a la tracción aumenta progresivamente con FC-C, mientras que FC-A y FC-B requieren mayores contenidos de fibra para mayores aumentos relativos.

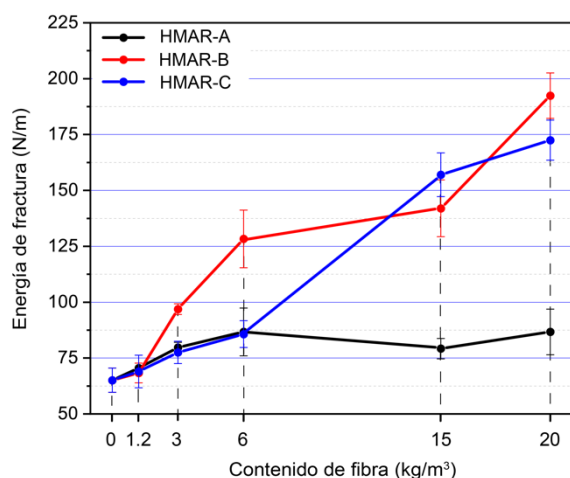


Figura 5. Energía de fractura de cada hormigón y contenido.

La energía de fractura de todas las mezclas y contenidos de fibra (Figura 5) muestra una tendencia ascendente hasta 6 kg/m³, alcanzando un máximo de 92,5 N/m para HMAR-A, un aumento del 42% respecto al hormigón simple. Para concentraciones de 15 y 20 kg/m³, no hay una tendencia clara debido a la alta cantidad de fibras y la baja trabajabilidad.

HMAR-B muestra una tendencia ascendente hasta 20 kg/m³, alcanzando 192,4

N/m, un aumento del 195% respecto al hormigón simple. La cantidad equilibrada y la relación de aspecto de las fibras mejoran la interfaz de unión matriz-fibra, uniendo grietas más grandes.

HMAR-C muestra una tendencia ascendente constante, alcanzando 172,5 N/m para 20 kg/m³, un aumento del 165% respecto al hormigón simple. El mayor número de fibras mejora la tenacidad a la fractura, aunque también aumenta la variación de los resultados para concentraciones superiores a 6 kg/m³. Para concentraciones inferiores a 6 kg/m³, HMAR-B obtiene mayor energía de fractura debido a la mayor cantidad de fibras de 3 mm.

5. Conclusiones

En el estudio del hormigón de muy alta resistencia, se encontraron varios resultados clave:

- La energía de fractura óptima se observó en mezclas con 6 kg/m³ de fibras de carbono, tipos A y B.
- La inclusión de 6 kg/m³ de fibra de carbono afecta selectivamente la porosidad, influyendo en el comportamiento del hormigón bajo estrés.
- La mezcla HMAR-C-6 mostró un aumento del 17,4% en la resistencia a la compresión.
- HMAR-B-6 destacó en energía de fractura con 81,2 N/m, reduciendo significativamente las porosidades más grandes.

Estos hallazgos subrayan la interacción entre el contenido de fibra, la porosidad y el rendimiento del hormigón, y permiten formulaciones optimizadas para aplicaciones exigentes.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por la financiación recibida para la realización de este

trabajo, a través del proyecto PID2023-147971OB-C32, otorgado por el Ministerio de Economía y Competitividad. Asimismo, agradecen a Comet Technologies Canada Inc. por proporcionar el software Dragonfly 2024.1.

Referencias

- [1] Cifuentes H, Ríos JD, Martínez-De La Concha A. (2023) Analysis of the behavior of very high strength concrete subjected to thermal shock loading. *Hormigón y Acero* 2022;73:73–9. Doi: 10.33586/hya.2020.2284.
- [2] Ríos JD, Leiva C, Ariza MP, Seidl S, Cifuentes H. (2019) Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography. *Materials and Design* 2019;165:107582. Doi: 10.1016/j.matdes.2019.107582.
- [3] Ibrahim AM, Abd SM, Hussein OH, Tayeh BA, Najm Hadee M, Qaidi S. (2022) Influence of adding short carbon fibers on the flexural behavior of textile-reinforced concrete one-way slab. *Case Studies in Construction Materials* 17:e01601. Doi:10.1016/J.CSCM.2022.E01601.
- [4] Wang Z, Ma G, Ma Z, Zhang Y. (2021) Flexural behavior of carbon fiber-reinforced concrete beams under impact loading. *Cement Concrete Composite* doi: 118:103910. Doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103910.
- [5] Yazdani N, Mohanam V. (2014) Carbon Nano-Tube and Nano-Fiber in Cement Mortar: Effect of Dosage Rate and Water-Cement Ratio. *International Journal of Material Sciences*. 4:45. Doi: 10.14355/ijmsci.2014.0402.01.
- [6] EN-12390-3: 2009. Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens, AENOR,. Brussels, European Committee for Standardization (CEN): 2009.
- [7] RILEM TCM-85, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. vol. 18. 1985. <https://doi.org/10.1007/BF02472918>.