

Análisis del comportamiento de hormigones con hibridación de fibras de acero y nanofibras de carbono

Analysis of behavior of concrete with hybridization of steel fibers and carbon nanofibers

Rubén Serrano-Somolinos, María-Isabel Prieto-Barrio, Pilar-de-la-Rosa García e Inmaculada Martínez-Pérez
Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9026>

El hormigón armado es el material estructural más empleado debido a su versatilidad y bajo coste. Entre otros tipos de adiciones que se añaden al hormigón, se encuentran las fibras, que son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón con el fin de mejorar algunas de sus propiedades. Existen diferentes tipos de fibras en función de su naturaleza: fibras de acero, fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas, cuyos efectos se detallan de forma concreta a continuación [1].

La incorporación de fibras de acero modifica el comportamiento no lineal del hormigón estructural, especialmente en tracción, impidiendo la abertura y propagación de las fisuras y aumentando su resistencia residual después de la formación de la primera grieta, su ductilidad y su tenacidad. Esta mejora de resistencia y control de la fisuración se produce al aumentar la absorción de energía, lo que las hace idóneas para su empleo en elementos estructurales que necesiten soportar altas fuerzas dinámicas (impacto o vibración). El efecto que producen en el hormigón depende del tipo y porcentaje de fibra incorporado. Actualmente se emplean este tipo de fibras en todo tipo de hormigones, observándose una reducción de la fluencia básica y de la contracción autógena a edades tempranas en el caso de hormigones ligeros [2-3]. En cuanto a su resistencia al fuego, el hormigón con adición de fibras metálicas mejora su comportamiento respecto a un hormigón tradicional, aumentando su absorción de energía y reduciendo su fisuración. El hor-

migón con fibras de acero, sometido a la acción directa del fuego, alcanza temperaturas más altas que el hormigón sin adiciones, pero se enfría más lentamente que el hormigón tradicional, lo que disminuye la fisuración en la fase de enfriamiento [4].

Actualmente las fibras sintéticas son usadas en todo el mundo por ser químicamente inertes, no producir corrosión interna, tener una gran resistencia a los ácidos minerales, álcalis y a las sales orgánicas, ser estables y no absorber agua. De manera general, las propiedades fundamentales que aportan al hormigón son: control del agrietamiento, aumento de la resistencia al impacto, a la fatiga, a la abrasión y al desgaste, reducción de la permeabilidad y porosidad capilar del hormigón y aumento de la resistencia a tracción y flexión [5]. El hormigón con adición de fibras de polipropileno en porcentajes del 1 y 2% en peso de cemento, alcanza una mayor resistencia a compresión que el hormigón sin adiciones y que el hormigón con los mismos porcentajes de fibras de acero [4].

El comportamiento frente a altas temperaturas también mejora con la incorporación de fibras de polipropileno en el hormigón, influyendo de forma determinante el contenido de fibra en la resistencia a la compresión. El hormigón con fibras de polipropileno se enfría más lentamente que el hormigón tradicional, debido a su capacidad para disminuir la presión en la red de poros cuando se las somete a altas temperaturas, reduciendo significativamente la fisuración [4, 6].

Cambiando de escala, los avances en el campo de los nanomateriales presentan una invaluable oportunidad de desarrollar materiales compuestos, proporcionándonos una dimensión extra para interactuar con el hormigón como adición.

Es conocido que la adición de nanofibras de carbono (CNFs) en el cemento mejora la resistencia a la flexión, la ductili-

dad, la tenacidad a la fractura y el control de las microfisuras [7]. Estudios realizados con óxido de grafeno (GO) muestran que el material posee una buena estabilidad química y una alta conductividad térmica y eléctrica, que lo hace idóneo para la fabricación y el uso en diferentes aplicaciones, sobre todo cuando se precisa una buena gestión térmica. El empleo de grafeno junto con el hormigón, permite conseguir mejoras en las propiedades del hormigón, aumentado la resistencia a tracción y a flexión, así como su durabilidad [8].

No son numerosas las investigaciones realizadas en la combinación de CNFs con el hormigón. Algunos de los resultados encontrados muestran que la adición de CNFs a la pasta de cemento mejora la resistencia a flexión, la ductilidad, la tenacidad a la fractura y el control de las microfisuras, debido a su gran superficie específica [9,10]. Otras investigaciones en esta línea han demostrado, que el empleo de bajas concentraciones de CNFs y de CNTs aumenta a edades tempranas la resistencia a compresión. Este aumento de la resistencia, depende en mayor medida de la cantidad de fibras que del grado de dispersión de las mismas. Cabe destacar, que la adición de CNTs al 0,1% en peso de cemento contribuye a disminuir la velocidad de corrosión y aumenta significativamente su resistencia, retrasando el inicio de la corrosión [11]. Del comportamiento del hormigón con hibridación de fibras de acero o de polipropileno y nanomateriales apenas existen investigaciones [12], por lo que el objetivo de la presente investigación es analizar el comportamiento del hormigón estructural en masa, cuando se adicionan fibras de diferente escala (fibra de acero y CNFs), con el fin de estudiar si su hibridación produce mejoras en su comportamiento respecto a un hormigón sin adiciones.

1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El hormigón empleado y su dosificación forman parte de una amplia campaña experimental correspondiente a una tesis doctoral, en la cual se han estudiado hormigones con distintos tipos de fibras y porcentajes con el fin de buscar el mejor comportamiento estructural [13]. En el presente trabajo se muestra el estudio correspondiente al comportamiento del

hormigón estructural en masa con hibridación de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero en comparación con hormigones sin adiciones, para lo que se elaboró hormigón en masa con una dosificación de c: a: g: w de 1: 2: 3: 0.5. Los materiales empleados se indican a continuación:

- El cemento utilizado en las amasadas es CEM II/BL 32,5, perteneciente a la empresa LafargeHolcim, que cumple con la instrucción UNE-EN 197-1:2011 [14].
- Los áridos empleados provienen de la planta de Allas (Adades-Segovia) que pertenece a la empresa Áridos Siro. El árido grueso es de fracción granulométrica 4-20 mm de naturaleza silícea lavada, empleándose para el ensayo un tamaño máximo de 12 mm y cumple con la norma UNE-EN 12620 [15]. La arena utilizada es arena fina de río de fracción granulométrica 0-6 mm de naturaleza silícea lavada, según la Norma UNE-EN 13139 [16].
- El agua utilizada procede del sistema de suministro del Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid, ya que cumple con las prescripciones técnicas que se establecen para el hormigón estructural.

En cuanto a las adiciones, se emplearon dos tipos:

- Nanofibras de carbono (CNFs). Material sintético de carbono nanoestructurado, de naturaleza similar al grafito.
- Fibras de acero (FA) Sika Fiber CHO65/35 NB: Fibras de alambre de acero trellado y con doblez en las

terminaciones. Cumplen con la norma ASTM A 820, Tipo 1.

Las características físicas y la composición química de los materiales empleados se indican Tabla I.

La dosificación de los materiales empleados en cada amasada se indica en la Tabla II.

Con los materiales indicados se elaboraron probetas cilíndricas de 200 mm de altura y 100 mm de diámetro para su posterior ensayo a compresión hasta la rotura. Para ello, se realizaron dos amasadas, en la primera amasada se procedió a confeccionar las probetas cilíndricas de hormigón en masa sin adición como muestras de referencia (SA) y en la segunda amasada se elaboraron las probetas con adición de nanofibras de carbono (1% en peso de cemento) y fibra de acero (1% en peso de cemento) hibridadas (GF-FA).

Para el ensayo de conductividad térmica, se elaboraron probetas cúbicas de 150x150x150mm³. Se fabricó hormigón en masa con las mismas dosificaciones y materiales empleados en las probetas cilíndricas, sin fibras (SA.CT) y con hibrida-

ción de nanofibras de carbono y fibras de acero en los mismos porcentajes en peso de cemento (GF-FA.CT).

El mezclado se realizó en seco y a mano para permitir una perfecta homogeneización de las fibras y una dispersión homogénea por toda la matriz de cemento. Una vez confeccionado el hormigón se rellenaron los moldes, según la norma de ensayos de hormigón fresco según UNE-EN 12390-2, 2009 [17], cuyas características geométricas cumplen, en todo caso, la norma de ensayos de hormigón endurecido (UNE-EN 12390-1, 2013) [18]. Se llenaron los moldes en tres tongadas compactando el hormigón con una barra compactadora de acero, picando cada capa 25 veces, hasta enrasar el molde con el hormigón. Posteriormente se mantuvieron durante 24 horas a temperatura ambiente de laboratorio a 22 °C aproximadamente ± 3 °C y humedad relativa aproximada del 60 %, antes de proceder a su desencofrado.

Transcurrido este tiempo, se desmoldaron y se guardaron en una cámara de curado a temperatura de 20 °C ± 2 °C y

Tipo de adición		SA	CNFs + FA
Nº de probetas	Cilíndricas	3	3
	Cúbicas	2	2
Dosificación(c/a/g/w)		1/2/3/0.5	
Cemento (kg/m ³)		230	230
Arena (kg/m ³)		460	460
Grava (kg/m ³)		690	690
Agua (l/m ³)		115	115
Adición (kg/m ³)		0	2,3 + 2,3

Tabla II: Dosificación de las amasadas

Cemento	SO ₃	≤ 3,50 %	Resistencia a compresión a 28 días	≥ 32,5 MPa ≤ 52,5 MPa
	Cl ⁻	≤ 0,10 %	Expansión (Le Chatelier)	≤ 10 mm
	Cromo (VI) soluble en agua	≤ 2 ppm	Tiempo inicio de fraguado	≥ 75 min
	Resistencia a compresión a 7 días	≥ 16 MPa	Tiempo final de fraguado	220 min
Arena	Cl ⁻	≤ 0,005 %	Equivalente de arena	≤ 75
	Partículas ligeras	≤ 0,50 %	Densidad saturada superficie seca	2,549 g/cm ³
	Sulfatos solubles en ácido	≤ 0,80 %	Materia orgánica	Exenta
	Azufre total	≤ 0,11 %	Absorción de agua	3%
Grava	Cl ⁻	≤ 0,001 %	Densidad saturada superficie seca	2,711 g/cm ³
	Sulfatos solubles en ácido	Categoría AS _{0,2}	Contaminantes orgánicos ligeros	≤ 0,50 %
	Azufre total	≤ 0,02 %	Absorción de agua	≤ 0,50 %
Fibras de acero	Densidad	7,85 g/cm ³	Longitud	35 mm
	Cantidad	15900 (unidades/kg)	Diámetro	0,54 mm
			Relación L/D	65 +/- 15 %
CNFs	Densidad	1,95 g/cm ³	Diámetro	100 nm
	Área superficial	45 m ² /g	Separación entre los planos de grafito	0.335-0.342 nmm

Tabla I: Características físicas y composición química de los materiales

humedad relativa $\geq 95\%$ durante 28 días. A continuación se procedió a ensayar a compresión las probetas de hormigón endurecido según UNE-EN 12390-3 [19] en la Universal Press MIB 60 / AM.

Los ensayos de conductividad térmica se realizaron según la norma ASTM D5334 [20], a 20 °C y 50 % de humedad relativa. Para realizar el ensayo de conductividad térmica, las probetas se mantuvieron en una cámara climática a 20 °C y 50 % de humedad relativa durante una semana, momento en el cual y bajo esas mismas condiciones se realiza el ensayo. Se introdujo la sonda TR-1 en el orificio practicado por la varilla y se dejó 15 minutos para que la temperatura de la sonda TR-1 se equilibrara con la temperatura de la pro-

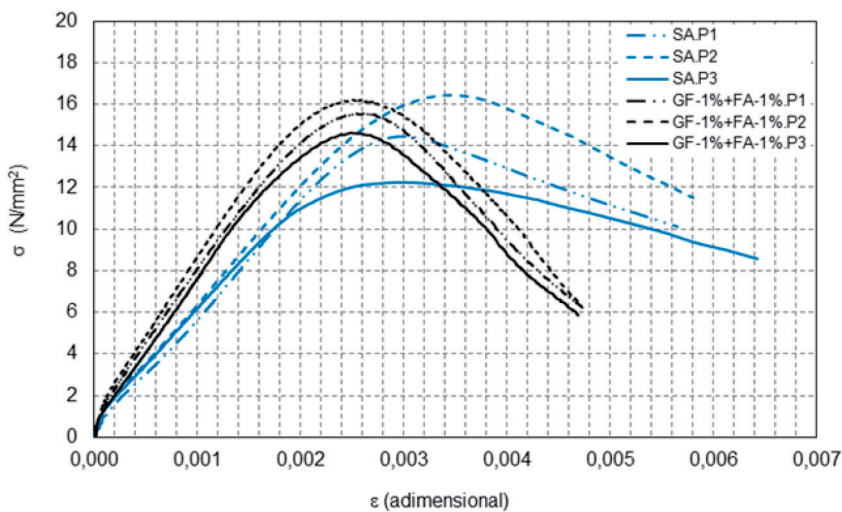


Fig. 1: Comparativa de la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre probetas con adición híbrida y probetas sin adición

	$\sigma_{\text{máxima}}$ (N/mm ²)	$\sigma_{\text{última}}$ (N/mm ²)	$\epsilon_{\text{máxima}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$\epsilon_{\text{última}} \times 10^{-3}$ (adimensional)	$E_{\text{máxima}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)	$E_{\text{última}} \times 10^{-2}$ (N/mm ²)
SA-P1	14,433	10,105	2,943	5,648	2,459	5,762
SA-P2	16,436	11,507	3,468	5,800	3,474	6,801
SA-P3	12,246	8,577	2,940	6,420	2,333	6,088
Valores medios	14,372	10,063	3,117	5,956	2,755	6,217
GF-FA.P1	15,546	6,223	2,625	4,730	2,516	4,871
GF-FA.P2	16,165	6,473	2,590	4,701	2,618	5,183
GF-FA.P3	14,609	5,852	2,505	4,685	2,210	4,550
Valores medios	15,440	6,183	2,573	4,705	2,448	4,868

Tabla III: Valores máximos y últimos más representativos del ensayo a compresión en probetas sin adición y con hibridación de fibras

beta. Una vez transcurrido este tiempo, se realizaron las medidas en las probetas de ensayo y cada una de las mediciones se repitió 3 veces, de acuerdo con la norma, y se calculó la media de las conductividades térmicas medidas en W/mK. En algunas de las probetas fue necesario realizar un orificio mayor mediante un taladro. En estos casos se empleó la sonda RK-1 junto con una mínima cantidad de pasta térmica superconductor que se introdujo con la ayuda de una jeringuilla para rellenar los huecos que hubiese podido crear la broca en el hormigón.

Para caracterizar microscópica y químicamente las probetas, se empleó la técnica Scanning Electron Microscopy (SEM) con el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-820 y software es el EDX Oxford ISIS-Link. Antes de introducir las muestras en el microscopio, se prepararon eligiendo los fragmentos más adecuados de las probetas por el método de corte fresco, para conseguir la superficie más característica. A partir de un recubrimiento de oro se consiguió que la superficie fuese conductora y, de esta forma, favorecer que los

	SA		GF-FA.CT	
	P1	P2	P1	P2
Medida 1	2,767	2,879	2,585	2,788
Medida 2	2,865	2,802	2,645	2,843
Medida 3	2,544	2,954	2,595	2,760
Media	2,802		2,703	

Tabla IV: Valores de la conductividad térmica en hormigón sin adición y con hibridación de fibras

electrones que inciden sobre la superficie de la probeta sean capaces de moverse y generar la imagen de estudio. A la vez que se tomaron las imágenes en el microscopio electrónico de barrido, el Sistema INCA permitió, mediante un detector de rayos X, obtener el análisis semicuantitativo de la composición química elemental de los materiales analizados.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos obtenidos en el ensayo a compresión con la prensa universal MIB 60/AM (fuerza (F) en kN y carrera (δ) en mm) se obtienen los resultados de " σ_c " tensión a compresión del hormigón

en N/mm² y los de " ϵ_c " deformación longitudinal unitaria del hormigón, adimensional, según las siguientes expresiones:

$$\sigma_c = F / A_c \quad (1)$$

$$\epsilon_c = \Delta L / L \quad (2)$$

Donde

A_c = Área de la sección

L = Altura de la probeta

Con estos datos se procedió a realizar las gráficas tensión-deformación y analizar los datos más representativos, que son $\sigma_{\text{máxima}}$ (tensión máxima del hormigón), $\sigma_{\text{última}}$ (tensión última del hormigón); $\epsilon_{\text{máxima}}$ (deformación máxima), $\epsilon_{\text{última}}$ (deformación última), $E_{\text{máxima}}$ (densidad de energía deformación máxima) y $E_{\text{última}}$ (densidad de energía deformación última).

La densidad de energía de deformación se calcula mediante la expresión:

$$E = \int \sigma \cdot d\epsilon \quad (3)$$

La Tabla III muestra los valores más representativos del ensayo a compresión en el hormigón sin adiciones y el hormigón con 1% de nanofibras de carbono (CNFs) y 1% de fibras de acero en peso de cemento, así como los valores medios de los mismos.

La Figura 1 muestra la evolución de la tensión (σ) respecto a la deformación (ϵ) entre probetas con adición de nanofibras de carbono (CNFs) y fibras de acero con respecto a hormigones tradicionales sin ninguna adición.

Según puede observarse en la Figura 1, las probetas sin adición tienen un comportamiento diferente a las probetas que incorporan adición de fibras híbridadas. En primer lugar se puede observar que las gráficas con hibridación de fibras muestran resultados homogéneos en todas las probetas, mientras que en las probetas sin fibras existe una mayor dispersión de los resultados. Aun así, se puede observar que

la capacidad para absorber energía en las probetas con adición híbridada disminuye con respecto a un hormigón tradicional, lo que se traduce en un material más frágil.

También se observa que esa fragilidad se produce a partir del momento en el que hormigón con fibras alcanza la tensión máxima, ya que aun siendo mayor la media de las tensiones máximas cuando las probetas incorporan las fibras, ésta se produce para una menor deformación y a partir de ese momento pierde ductilidad en la pendiente descendente de la curva.

La Tabla IV muestra los valores de la conductividad térmica en probetas sin adiciones y con la hibridación de fibras, a una temperatura de 20°C y un 50% de humedad relativa. Según se puede observar, la incorporación de las fibras en el porcentaje estudiado mantiene una conductividad térmica similar al del hormigón sin fibras.

En la Figura 2 se muestran las imágenes a 2000 y 5000 aumentos de la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la composición química elemental de las muestras a partir del análisis semi-cuantitativo de los áridos del hormigón y

la matriz. En la Figura 2a se muestra el hormigón sin adición, pudiéndose observar una clara estructura cerrada en forma globular, con fases intermedias y avanzadas de etringita, con una morfología sana y una buena integración de la pasta con el sulfato cálcico y el aluminio. El espectrograma permite observar la presencia de SiO_2 . El gel CSH ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), es un silicato cálcico que ha sufrido una reacción de hidratación para convertirse en un gel cementoso.

Generalmente la pasta de cemento hidratada está constituida por un conjunto de fases cristalinas tales como: la portlandita (Ca(OH)_2), la etringita y el monosulfato aluminato cálcico hidratado. Al fraguar el silicato cálcico hidratado se consigue trabar al árido (arena y/o grava) con la propia matriz.

La presencia de CaO es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de calcio y se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas o dolomías.

La presencia de oro (Au) es debido al recubrimiento que se incorpora a las muestras para conseguir una superficie

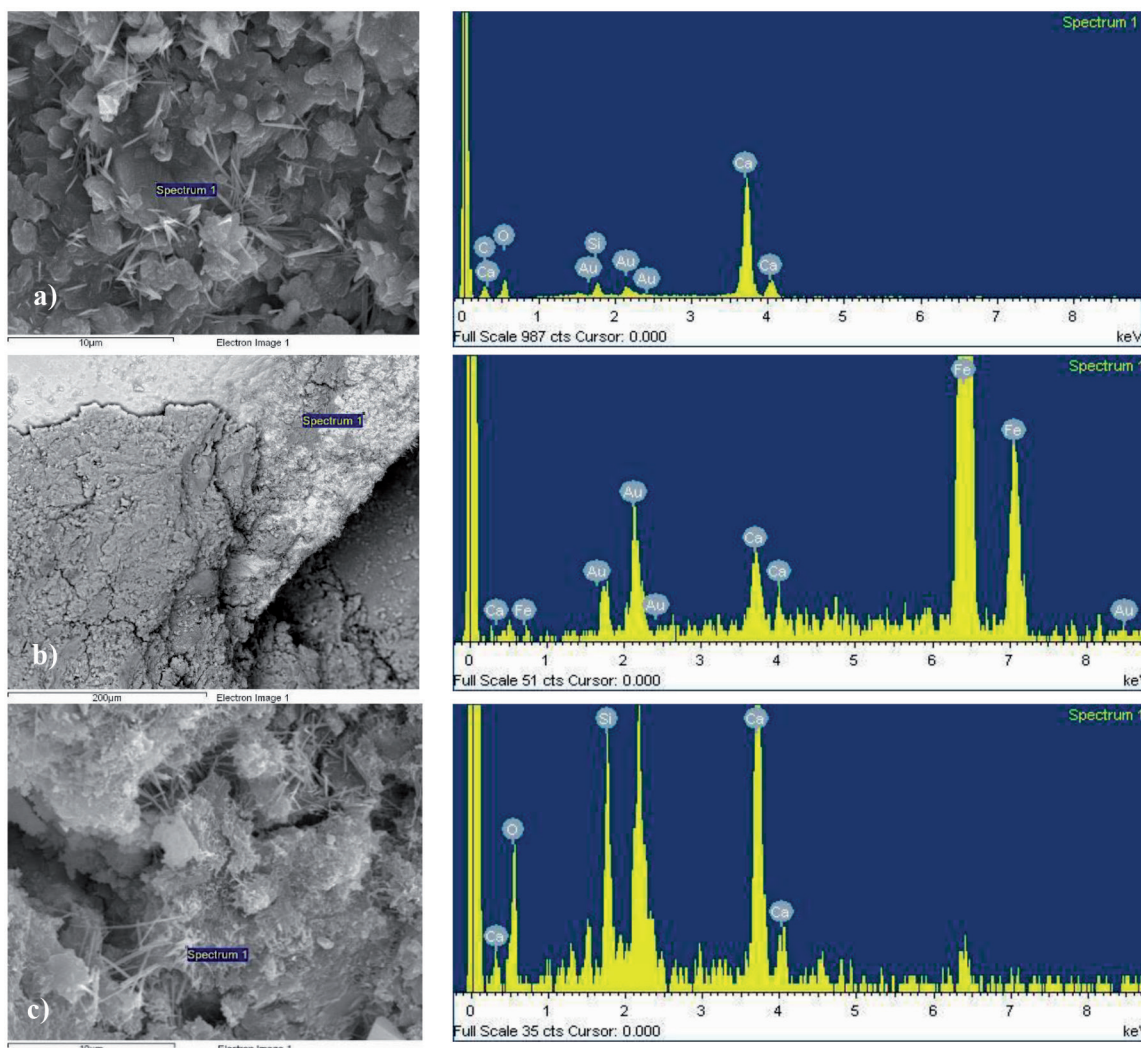


Fig. 2: Microscopía electrónica de barrido. a) sin adición (5000 aumentos), b) hibridación de fibras (2000 aumentos), c) hibridación de fibras (5000 aumentos)

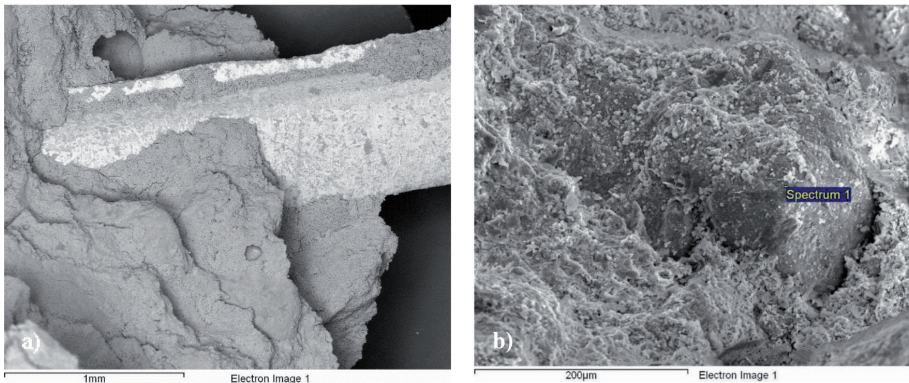


Fig. 3: Microscopía electrónica de barrido. a) unión fibra-matriz (100 aumentos), b) interfaz pasta-árido (300 aumentos)

conductora y proceder al estudio mineralógico de las muestras.

En la Figura 2b y 2c se muestra el hormigón con la adición de fibras. En el espectrograma de la Figura 2b se puede observar la presencia de hierro (Fe) en cantidades superiores al resto de minerales. En la Figura 2c se puede observar una forma globular que se corresponde con una buena integración de la mezcla; los nódulos quedan recubiertos por un conjunto de formas aciculares de diferentes tamaños y espesores, que se enlazan unas con otras hasta crear una trama cristalina.

En la Figura 3 se muestra la unión entre la fibra de acero y la matriz y la unión entre el árido y el gel cementicio, observándose una buena adherencia en ambos casos. En la figura 3b, con mayores aumentos, se observa la distribución y textura de un compuesto perfectamente homogeneizado, donde el gel del cemento, la formación de etringita y los áridos parecen un único compuesto.

3. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación, se puede extraer las siguientes conclusiones:

- El hormigón con hibridación de fibras de acero y nanofibras de carbono, en porcentajes del 1% en peso de cemento de cada fibra, muestra valores de las tensiones medias a compresión ligeramente superiores que hormigones sin adición, pero pierde ductilidad una vez alcanzada la tensión máxima.
- La conductividad térmica en hormigones sin fibras y con adición de fibras hibridadas en porcentajes del 1% de fibras de acero y 1% de CNFs en peso de cemento, son similares.
- Los hormigones con adición de fibras hibridadas de acero y CNFs presentan una buena adherencia entre el gel cementicio y los áridos, apor-

tando además el nexo de unión que proporcionan las fibras con el gel de cemento, que ayudará a disminuir la fisuración.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de fomento. Instrucción para el hormigón estructural (EHE-08). Con comentarios de la Comisión Permanente del Hormigón, 4ª Ed. Madrid: 2010.
- [2] Jong-Han L, Baiksoon C, Eunsoo C. "Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content". Construction and Building Materials. 2017. Vol. 138. p. 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.096>
- [3] Serrano R, Cobo A, Prieto MI. "Behavior analysis of concrete mixed with steel fibers". Anales de Edificación. 2016. Vol. 2 (1). p.1-6. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055>
- [4] Serrano R, Cobo A, Prieto MI, González MN. "Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers". Construction and Building Materials, 2016. Vol. 122. p. 302-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055>.
- [5] Kakooei S, Akil HM, Jamshidi M, Rouhi J. "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures". Construction and Building Materials. 2012. Vol. 27. p. 73-77. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015>.
- [6] Alves F, Carvalho MF, Rodrigues A, Bezerra AE. "Behavior of concrete reinforced with polypropylene fiber exposed to high temperatures". Procedia Structural Integrity. 2018. Vol. 11. p. 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.013>.
- [7] Vera J, Chozas V, Portillo D, García MJ, Gutiérrez A, Mieres JM, Grávalos J. "Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials". Nanotechnology in Construction. 2009. Vol. 3. p. 383-388. 2009. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00980-8>.
- [8] Chuah S, Pan Z, Sanjayan JG, Wang CM, Duan WH. "Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide". Construction and Building Materials. 2014. Vol. 73. p. 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>.
- [9] Metaxa ZS, Konsta-Gdoutos MS, Shah SP. "Carbon nanofiber cementitious composites: Effect of debulking procedure on dispersion and reinforcing efficiency". Cement and Concrete Composites. 2013-Vol. 36. p. 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.10.009>
- [10] Peyvandi A, Sbia LA, Soroushian P, Sobolev K. "Effect of the cementitious paste density on the performance efficiency of carbon nanofiber in concrete nanocomposite". Construction and Building Materials. 2013. Vol. 48. p. 265-269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.094>.
- [11] Konsta-Gdoutos MS, Batis G, Danoglidis PA, Zacharopoulou AK, Zacharopoulou EK, Falara MG, Shah SP. "Effect of CNT and CNF loading and count on the corrosion resistance, conductivity and mechanical properties of nanomodified OPC mortars". Construction and Building Materials. 2017. Vol. 147. p. 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.112>.
- [12] Alrekabi S, Cundy AB, Lampropoulos A, Whitby RLD, Savina I. "Mechanical performance of novel cement-based composites prepared with nano-fibres, and hybrid nano- and micro-fibres". Composite Structures. 2017. vol. 178. p. 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.045>.
- [13] Serrano R. "Estudio del comportamiento frente al fuego del hormigón en masa con adición de nanofibras de carbono (CNFs) y su comparación con hormigones sin adición y con otras adiciones". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2018.
- [14] AENOR. UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición. Especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes. AEN/CTN 80 - Cementos y cales. España. 2011.
- [15] AENOR. UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón. AEN/CTN 146 -Áridos. España. 2009.
- [16] AENOR. UNE-EN 13139/AC: 2004. Áridos para morteros. AEN/CTN 146 - Áridos. España. 2004.
- [17] AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). UNE-EN 12390-2:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. AEN/CTN 83 - Hormigón. España. 2009.
- [18] AENOR (Asociación Española de 2009 Normalización y Certificación). UNE-EN 12390-1:2013: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes. AEN/CTN 83 - Hormigón. España. 2013.
- [19] AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). UNE-EN 2013 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. AEN/CTN 83 - HORMIGÓN. España. 2009.
- [20] ASTM. Standard Test Method for 2009 Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. ASTM D5334. 2014.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa SIKA S.A.U., por su colaboración en esta investigación.