

Análisis del comportamiento del hormigón en masa con adición de fibras de polipropileno

Behavior analysis of mass concrete with added polypropylene fibers

Rubén Serrano-Somolinos, María-Isabel Prieto-Barrio, Inmaculada Martínez-Pérez y Sonsoles González-Rodrigo
Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8197>

1. INTRODUCCIÓN

Puesto que el hormigón es el material estructural más empleado, se hace necesario estudiar materiales que mejoren su comportamiento, sobre todo en el caso de encontrarse sometidos a un incendio, en el que está en juego la seguridad de las personas. Cuando las estructuras de hormigón se encuentran sometidas a la acción del fuego, en su fase inicial se produce la vaporización de la humedad constitutiva del hormigón, lo que consume una parte importante de su energía térmica, a la vez que se produce un proceso de deshidratación del hidróxido cálcico. Este proceso hace que en esta primera fase aumente su resistencia mecánica hasta llegar a los 280 °C, punto a partir del cual decrece a medida que la temperatura en el interior del hormigón aumenta [1]. En esta disminución de resistencia influye la carga de fuego, la situación y forma de la pieza y el proceso de enfriamiento, que produce la retracción del hormigón, originando la aparición de fisuras en el interior de la matriz, que la debilitan [2,3]. Otra consecuencia importante, es la pérdida de durabilidad del elemento, ya que aumenta la fisuración y se reducen los recubrimientos al evaporarse de forma brusca el agua contenida en los poros, lo que provoca unas tensiones importantes que originan el desprendimiento explosivo del hormigón (efecto *spalling*) [4].

Puesto que el hormigón en masa es un material frágil, con una baja resistencia a la tracción, la incorporación de fibras de polipropileno puede servir de puente entre las fisuras que pueden desarrollarse, proporcionando "ductilidad" (post-agrietamiento). Las fibras son elementos

de pequeña longitud y sección, que se incorporan a la masa de hormigón para proporcionar un aumento de la resistencia a compresión y una mayor resistencia al desgarramiento y a la propagación de fisuras, aumentando así su extensibilidad [5,6]. Las fibras de polipropileno (PP), debido a sus características físicas y mecánicas, pueden reducir la permeabilidad y porosidad capilar por efecto de bloqueo de los poros en el hormigón, aumentando así la adhesión entre las fibras y el hormigón, siendo una cantidad óptima de polipropileno 0,7 kg/m³ [7,8].

Además, las macrofibras pueden colaborar estructuralmente. Sus longitudes varían de 20 mm a 60 mm y deben relacionarse con el tamaño máximo del agregado. También se utilizan para mejorar el comportamiento al fuego, ya que el número de fibras por kilogramo es muy alto. Además de sus características físico-químicas, las microfibras se caracterizan por su frecuencia, es decir, el número de fibras presentes en 1 kg, que depende de la longitud y el diámetro de las fibras [9].

Cuando el hormigón con fibras de polipropileno se encuentra sometido a la acción del fuego, la permeabilidad del hormigón aumenta entre 80 °C y 130 °C, para una vez alcanzado su punto de fusión, alrededor de 170 °C, fluir a través de las fisuras y favorecer la evacuación de los gases y del vapor de agua, lo que libera la presión en los poros y reduce el agrietamiento [10-13].

A pesar de existir investigaciones sobre el comportamiento de elementos de hormigón con fibras sometidos a fuego, no se han encontrado investigaciones sobre el comportamiento a compresión de elementos sometidos a ensayos de fuego directo, con los porcentajes de fibras añadidos y en el rango de temperaturas que se estudian en el presente trabajo, y por tanto, el objetivo de trabajo es estudiar el efecto de la incorporación de fibras de PP en estructuras de hormigón en masa, en comparación con hormigones de uso

común, cuando se encuentran sometidas a temperaturas máximas de 400°C en un ensayo a fuego real, con el fin de evaluar su capacidad mecánica, su fisuración y su interfase, antes y después de someterlas a una agresión térmica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar el efecto de las fibras de PP en el comportamiento a compresión del hormigón en masa, se realizaron dieciocho probetas cilíndricas (200 mm x 100 mm de diámetro) utilizando un hormigón en masa (HM-25) según la instrucción de hormigón estructural EHE 08 [14], con una dosificación de c: a: g: w = 1: 2: 3: 0,5, según la dosis utilizada en el laboratorio de materiales de la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid (ETSEM). De las dieciocho probetas, se realizaron seis sin adición, seis contienen un 1 % en peso de cemento de fibras de PP de 20 mm de longitud y 0,3 mm de diámetro (Sikafiber tipo M-12) y las seis restantes, contienen fibras de PP al 2% en peso de cemento. Para preparar las probetas, se procedió a pesar por separado cada uno de los materiales utilizados. La mezcla se realizó en una amasadora planetaria de eje vertical con una capacidad máxima de 100 litros, en la que se introdujeron los materiales en el siguiente orden: grava, cemento y arena. Para incorporar las fibras PP a la masa de hormigón, se realizó un amasado manual. Después de incorporar todos los materiales excepto el agua en la amasadora, se llevó a cabo el proceso de amasado con las paletas giratorias durante dos minutos, con el fin de homogeneizar toda la mezcla seca. Posteriormente, se vertió gradualmente el agua, teniendo en cuenta el contenido de humedad de los áridos, hasta que se observó visualmente una consistencia plástica del hormigón. La duración del proceso de amasado fue de aproximadamente 5 minutos, incluyendo los 2 minutos de amasado en seco. Una vez preparado el hormigón fresco, se procedió al llenado de los moldes, cuyas características geométricas cumplen con los parámetros establecidos en la norma UNE-EN 12390-1:2013 [15].

Después de llenar los moldes con el hormigón, de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-2:2009 [16], las probetas se mantuvieron durante 24 horas a una temperatura ambiente de laboratorio de



Fig. 1: a) Ensayo de resistencia a compresión, pre-factura y fisuración de la matriz del hormigón con fibras; b) Ensayo a fuego directo y probeta de hormigón después del incendio

aproximadamente 22 ± 3 °C y 60 % de humedad relativa antes de demoldarlas y curarlas en una cámara húmeda durante 28 días. A continuación, sobre la mitad de las probetas, se procedió a realizar el ensayo de resistencia a compresión de probetas de hormigón endurecido, según UNE-EN 12390-3 [17], en una prensa universal MIB 60 / AM, según se muestra en la Fig. 1a. El resto de la probetas fueron ensayadas a fuego directo según la norma ISO R-834 [18] y los diferentes criterios establecidos en las normas UNE-EN 1363-1, UNE-EN 1363-2 y UNE-EN 1365-4 [19-21], intentando reproducir las condiciones más similares posibles a un incendio real en el interior de un edificio y estudiar la exposición del elemento estructural al fuego directo, evitando la precisión de temperatura controlada en el horno a lo largo de la masa y causando diferencias en temperatura en sus diferentes zonas. Se consideró un potencial calorífico de 40 kg de madera por metro cuadrado (kg/m²), que es equivalente al valor medio del potencial calorífico en incendios de edificios. El ensayo se realizó durante una hora, midiendo la temperatura en la superficie de las muestras, mediante un termómetro compacto modelo "Testo 845" (Fig. 1b). La temperatura máxima alcanzada es 400 °C, con una temperatura media de $200 \text{ °C} \pm 25 \text{ °C}$. Una vez ensayadas a fuego, se dejaron enfriar lentamente las probetas, esperando a que el calor se disipase para retirarlas de la rejilla y evitar la concentración de tensiones y el aumento de la fisuración. Las probetas sometidas a la agresión térmica se ensayaron posteriormente a compresión, según UNE-EN 12390-3 [17].

La caracterización química y microscópica de las muestras se realizó después del ensayo a compresión. La microscopía electrónica de barrido (SEM), que permite la caracterización de la estructura de las probetas, fue utilizada para examinar la estructura interna del hormigón con fibras y compararla con el hormigón sin

fibras antes y después del ensayo a fuego directo. Las imágenes se obtuvieron con electrones secundarios y retrodispersados, y la escala de trabajo utilizada osciló entre 50 y 10000. Con el detector de rayos X (EDX) se realizaron microanálisis puntuales y zonales. El equipo SEM utilizado fue el JEOL JSM-820 con microanálisis. El software utilizado para la adquisición, procesamiento y evaluación de los datos EDX es Oxford ISIS-Link.

Las muestras obtenidas por el método de corte fresco fueron revestidas con oro para lograr la conductividad necesaria en la superficie. Mientras que las imágenes fueron tomadas utilizando el microscopio electrónico de barrido, se utilizó un sistema INCA con un detector de rayos X para el análisis semicuantitativo de la composición química de los materiales ensayados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El valor más característico del gráfico tensión-deformación es la resistencia del hormigón, a partir de los datos de la fuerza en kN y del área de la sección de la probeta cilíndrica en mm² y la longitud de la misma. Los resultados obtenidos de la resistencia a compresión del hormigón " σ_c " en N/mm² y la deformación del hormigón " ϵ_c ", se obtienen a partir de las fórmulas (1) y (2).

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

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

En las gráficas tensión-deformación, los datos más representativos son analizados, entre los que se incluyen la tensión máxima del hormigón " $\sigma_{\max}$ ", la tensión última del hormigón " σ_{ult} ", la deformación máxima del hormigón " $\epsilon_{\max}$ ", la deformación última del hormigón " ϵ_{ult} ", la máxima densidad de energía de la deformación $E_{\max}$ (N/mm²) y la densidad de energía de deformación última generada durante el ensayo " E_{ult} " (N/mm²). La densidad de energía de deformación es la energía de deformación por unidad de volumen, obtenida a partir de la siguiente fórmula (3).

$$E = \int_0^{\epsilon} \sigma \cdot d\epsilon \quad (3)$$

Fig. 2 muestra una comparación entre las probetas con 1 % y 2 % en peso de cemento de fibras de PP y probetas sin PP añadido, antes y después del ensayo a fuego directo. Antes del ensayo a fuego, las probetas de hormigón en masa con 1% y 2 % de fibras en peso de cemento muestran valores de resistencia similares independientemente del porcentaje de fibras. El aumento continuo de la carga

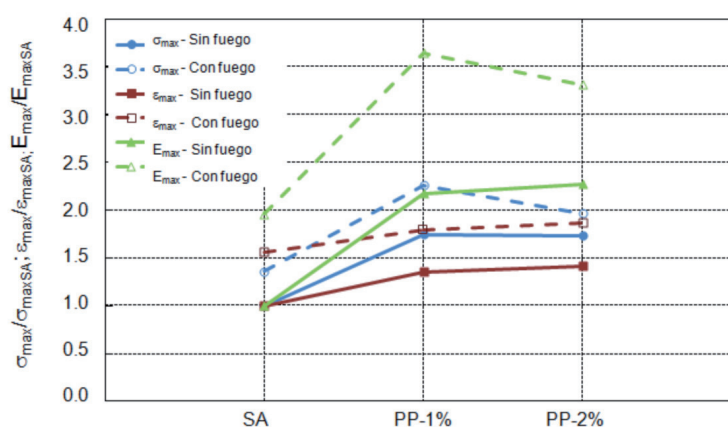


Fig. 2: Comparación de $\sigma_{\max}$, $\epsilon_{\max}$ y $E_{\max}$ entre hormigón con 1% y 2% de fibras de PP y sin adición, antes y después del ensayo a fuego directo

provoca el aumento de la deformación y la densidad de energía de deformación también aumenta con el porcentaje de fibras. Para ambos porcentajes de fibras, la tensión máxima es mucho mayor que en las probetas sin PP añadido, aumentando la resistencia hasta el 70 %.

Después del ensayo a fuego, la presencia de fibras de polipropileno en porcentajes del 1 % y 2 % mejora considerablemente la resistencia del hormigón cuando se someten a la acción del fuego para el rango de temperatura de $200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, aumentando la tensión hasta el 125 %, pero no mejora su comportamiento al aumentar el porcentaje de fibras añadido.

Fig. 3 muestra que la presencia de fibras de polipropileno hace que las temperaturas alcanzadas sean menores que en

las muestras sin adiciones, pero aún más importante es el enfriamiento gradual producido por las fibras, ya que evita fisuras en el material, como consecuencia del punto de fusión del polipropileno ($173\text{ }^{\circ}\text{C}$), que convierte las probetas en un material más elástico. No existen diferencias de temperatura significativas entre las probetas con 1 y 2 % de fibras de polipropileno.

El SEM revela en las probetas de HM-25 sin PP (Fig. 4a), la presencia del gel de silicato cálcico hidratado (CSH) formado por la hidratación de la pasta. Puede verse con claridad, que la zona comprendida entre el árido y la matriz presenta una textura globular con una perfecta adherencia, lo que indica una excelente homogeneización. Si se analiza más pormenori-

zadamente la matriz de un nódulo, puede observarse la formación de pequeños grumos gel de CSH, junto con finas fibras de silicato cálcico hidratado cristalizado en forma de acícula junto con otras algo más gruesas de etringita. La textura del material en forma acicular, que se observa en la figura a la derecha, permite apreciar que las fibras están orientadas radialmente hacia el exterior del nódulo, conformando una estructura cerrada y densa, perfectamente trabada.

El silicato cálcico hidratado es uno de los compuestos hidratados principales del cemento y el responsable de sus propiedades resistentes, confiriendo cohesión a la matriz cementicia y rigidez al conjunto pasta-árido.

En la Fig. 4b, se muestran los resultados del estudio microscópico sobre las probetas con adición de 1% y 2% en peso de cemento de PP. Como se puede observar, la unión entre el árido y la pasta de cemento es aún más definida, consiguiendo prácticamente que aparezca un único material continuo y homogéneo, alcanzando el monolitismo deseado. Los nódulos anidados de CSH también se muestran en una etapa más desarrollada, donde las matrices de gel de silicato se agrupan, dejando espacios cada vez más cerrados y trabados por las fibras de CSH y la fase AF_r . Como puede observarse en este caso, la propia fibra de PP está recubierta por una malla con formas aciculares de menor tamaño. Estos datos justifican el mejor comportamiento demostrado en los ensayos de resistencia a compresión en las probetas que contienen fibras de polipropileno.

Al mismo tiempo que se realizan las imágenes con el microscopio electrónico de barrido, se obtiene el análisis semicuantitativo de la composición química elemental de los áridos del hormigón y de la matriz mediante energía dispersa de rayos X. En las descripciones mineralógicas aparece la presencia de SiO_2 , también llamado gel CSH, porque tiene la fórmula $\text{CaO SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Es un silicato cálcico que ha sufrido una reacción de hidratación para convertirse en un gel cementoso. Generalmente, las pastas de cemento hidratadas están constituidas por un conjunto de fases cristalinas tales como: portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), etringita y monosulfoaluminato cálcico hidratado. Al fraguar el silicato cálcico hidratado, se consigue trabar el 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 el óxido de calcio puede aparecer y se obtiene como resultado de la calcinación de rocas calizas o dolomías. Finalmente men-

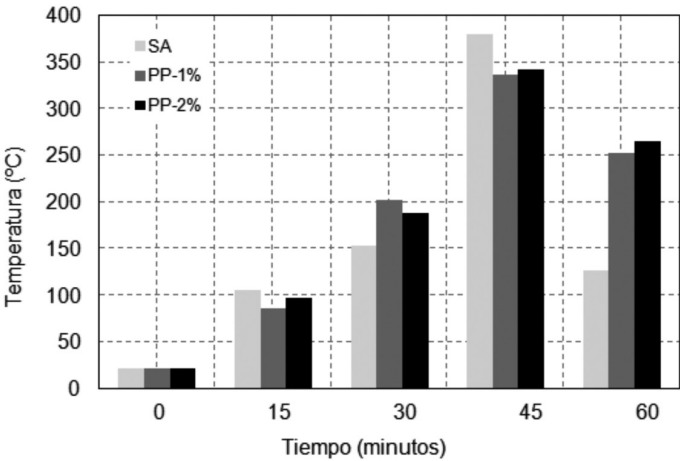


Fig. 3: Comparación de las temperaturas alcanzadas en el ensayo a fuego directo en probetas con fibras de polipropileno al 1% y 2% y sin adiciones

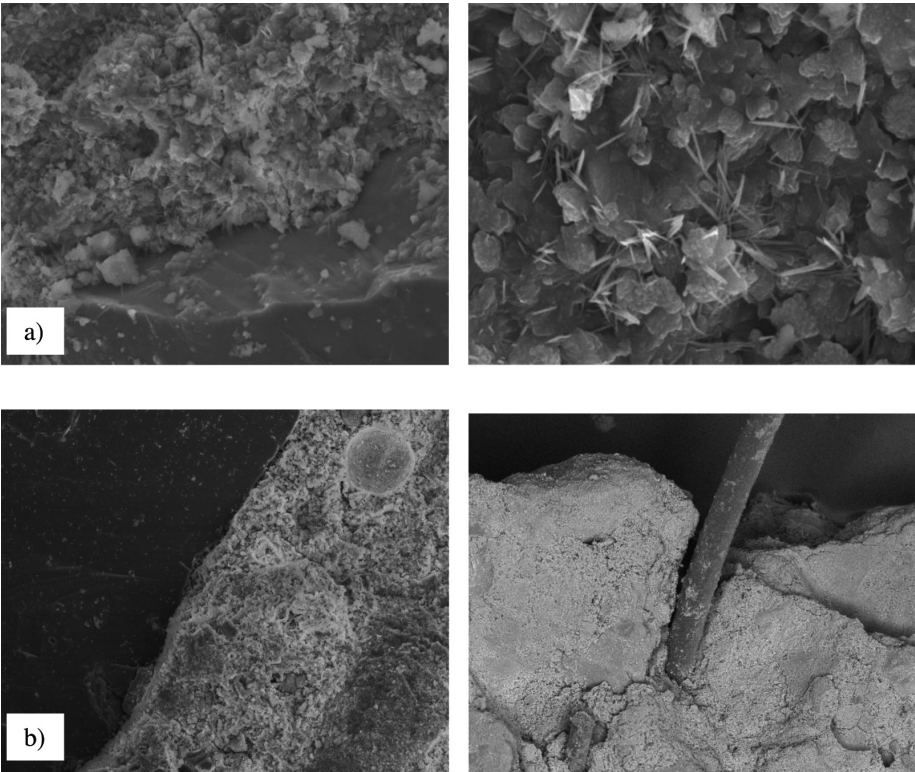


Fig. 4: Microscopía electrónica de barrido (SEM) en hormigón sin adiciones (a) y con PP al 1% y 2% (b)

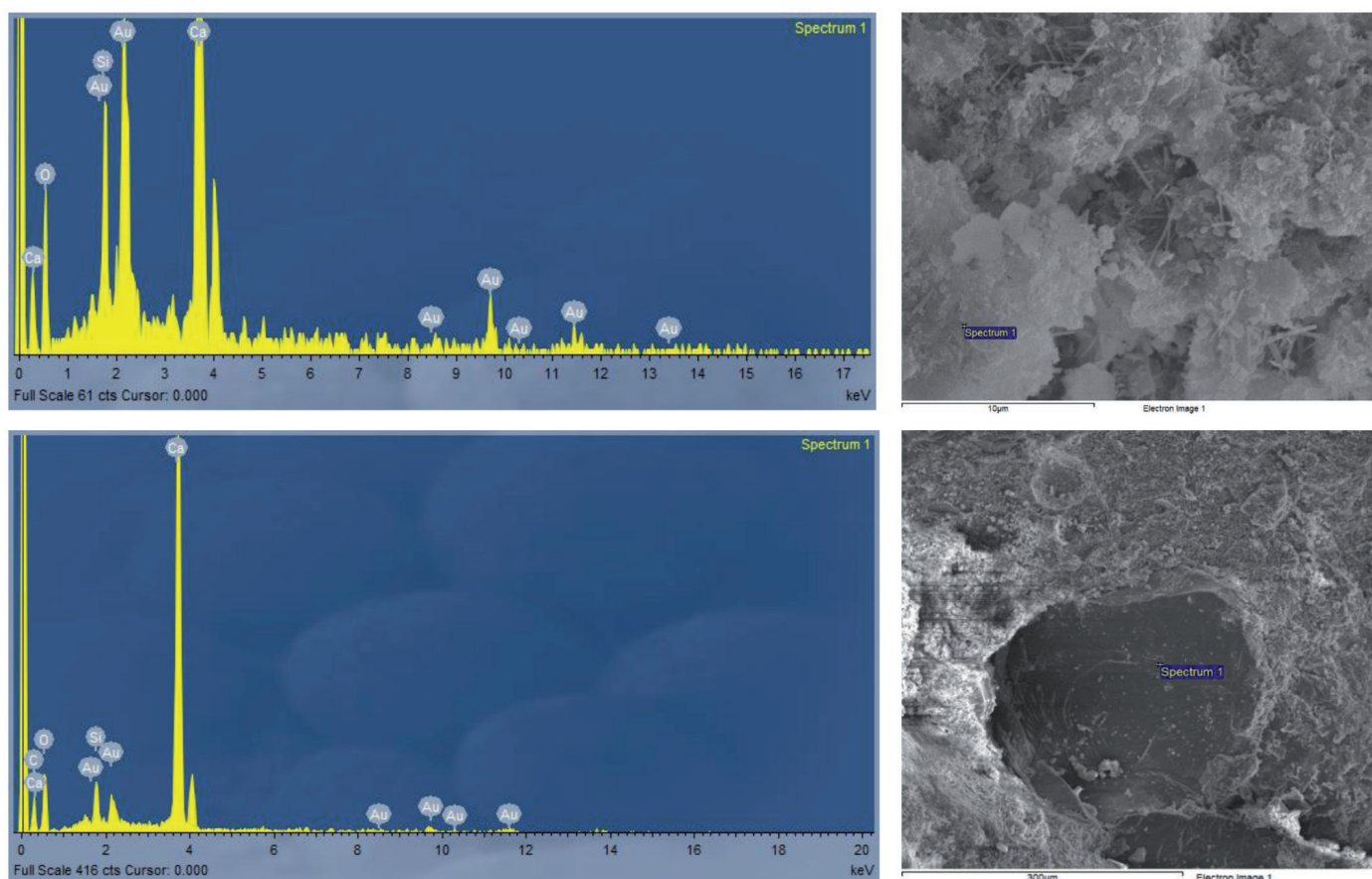


Fig. 5: Microanálisis por energía dispersa de rayos X en probetas sin adiciones (a) y con PP (b)

cionar que la presencia de oro (Au) se debe al recubrimiento de oro para lograr una superficie conductora. Este análisis muestra también la presencia de carbono en el espectrograma de la figura 5, que demuestra la existencia de polipropileno (PP) presente en forma de fibras. El polipropileno, al ser un polímero termoplástico, parcialmente cristalino, produce el efecto de mayor adhesión en el interior de la pasta.

Saber cómo varía la composición mineralógica y la disposición a nivel de las fibras en una probeta de hormigón después de una exposición al fuego, es necesario para explicar el diferente comportamiento en cuanto a su resistencia a compresión. Como puede verse en la Fig. 6a, la unión de la matriz cementicia y la fibra de polipropileno es casi perfecta, consiguiendo como resultado que el material trabaje solidariamente y permita sumar las propiedades intrínsecas de la fibra de polipropileno.

La Fig. 6b corresponde a una muestra sometida al ensayo a fuego directo, donde puede observarse con absoluta claridad una dispersión de las fibras de polipropileno por la matriz de cemento, aumentando la abertura de poros en la masa. La matriz cementicia fragmentada queda unida por las fibras de polipropileno diseminadas, que ocupan los espacios de los poros existentes de la deshidratación. El aumento

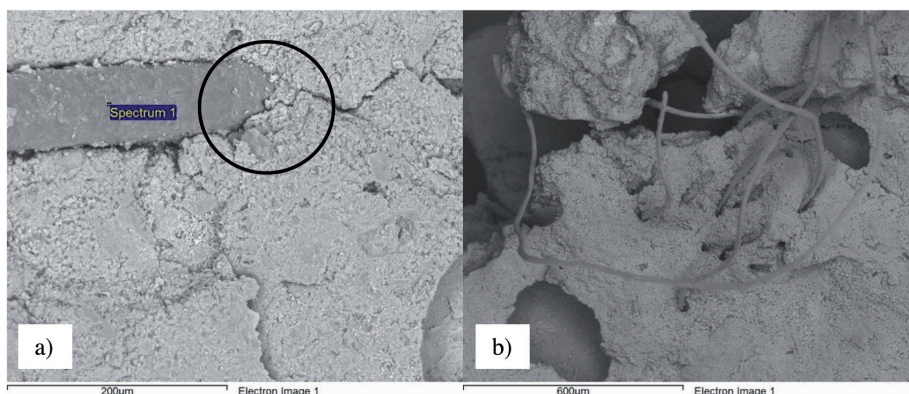


Fig. 6: Microscopía electrónica de barrido (SEM) en hormigón con PP, a) antes del ensayo a fuego y b) después del ensayo a fuego

de presión y temperatura en el interior del cemento provoca la fusión del polipropileno dada la temperatura media de 200 °C alcanzada en la probeta, fundiendo las fibras y generando numerosos hilos en estado plástico de polipropileno que ocupan los huecos de la matriz cementicia y reconstruyendo así los huecos y fisuras de las probetas, logrando un mejor comportamiento mecánico y con mejores resultados en este rango de temperatura.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo experimental se ha estudiado la influencia de la adición

de fibras de polipropileno en el comportamiento a compresión del hormigón de masa, tanto antes como después del ensayo a fuego directo, tanto desde el punto de vista de su resistencia como de su deformación, obteniendo las siguientes conclusiones:

- El hormigón de masa con adición de fibras de polipropileno en porcentajes del 1% y 2% en peso de cemento soporta mayores resistencias en comparación con el hormigón sin PP añadido. La elasticidad del material con adición de PP aumenta con la cohesión entre los materiales que lo forman y proporciona un mejor con-

trol de la fisuración evitando la abertura y la propagación de las fisuras, no existiendo diferencias significativas en el comportamiento entre las probetas con 1% y 2% en peso de PP añadido.

- El único inconveniente es que hay una mayor pérdida de ductilidad una vez que se alcanza la máxima resistencia.
- El hormigón con adición de polipropileno, sometido a un fuego directo de 400 °C de temperatura máxima, alcanza temperaturas más bajas y se enfría más lentamente que el hormigón sin adiciones, reduciendo la fisuración del hormigón.
- La resistencia a compresión del hormigón con fibras de polipropileno es mayor que la del hormigón sin adiciones, cuando se somete a agresiones térmicas de 400 °C de temperatura máxima, pero no mejora su comportamiento añadiendo más porcentaje de fibras de polipropileno.
- El uso del SEM ha permitido identificar el gel CSH, el silicato cálcico hidratado en forma de acícula y otras fibras más gruesas de etringita.
- Cuando se añaden fibras de polipropileno, las matrices de gel de silicato se agrupan, cada vez más cerradas, dejando la propia fibra de PP cubierta por una malla con formas aciculares más pequeñas, lo que corrobora el mejor comportamiento demostrado en las pruebas de resistencia a compresión de las muestras que contienen fibras de polipropileno.
- Cuando el hormigón con fibras de polipropileno se somete a la acción directa del fuego, el uso del SEM ha permitido observar el aumento de la porosidad en la matriz de cemento y la fusión de las fibras de polipropileno, que ocupan los poros del cemento y mejoran su comportamiento mecánico.
- Los resultados obtenidos indican que la incorporación de fibras de polipropileno es muy buena alternativa al hormigón tradicional, ya que mejora su resistencia y ralentiza su fisuración, especialmente en caso de ser sometido a la acción del fuego, o que sufren altas temperaturas.

Como continuación de este trabajo, el comportamiento del hormigón de masa será estudiado sujeto a la acción directa del fuego, con otras adiciones.

PARA SABER MÁS

- [1] Eamon CD, Jensen E, "Reliability analysis of reinforced concrete columns exposed to fire". *Fire Safety Journal*. November 2013. Vol. 62 –C. p.221–229. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.10.002>)
- [2] Bratina S, Cas B, et al. "Numerical modelling of behaviour of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2". *International Journal of Solids and Structures*. October 2005. Vol. 42–21–22. p.5715–5733. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2005.03.015>)
- [3] Doo-Yeol Y, Kyung-Hwan M, et al. "Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age". *Construction and Building Materials*. December 2014. Vol. 73. p.357–365. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.097>)
- [4] Lura P, Petro Terrasi G. "Reduction of fire spalling in highperformance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers. Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plasticprestressed self-compacting concrete". *Cement & Concrete Composites*. May 2014. Vol. 49. p.36–42. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.001>)
- [5] López-Buendía AM, Romero-Sánchez MD, Climent V, et al. "Surface treated polypropylene (PP) fibers for reinforced concrete". *Cement and Concrete Research*. December 2013. Vol.54. p.29–35. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.004>)
- [6] Ramezaniapour AA, Esmaili M, et al. "Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers". *Construction and Building Materials*. July 2013. Vol. 44. p.411–418. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076>)
- [7] Kakooei A, Akil HM; Jamshidi M, et al. "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures". *Construction and Building Materials*. February 2012. Vol.27. p.73–77. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015>)
- [8] Ding Y, Zhang C, et al. "Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire". *Construction and Building Materials*. June 2016. Vol. 113. p.456–469. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.070>)
- [9] AENOR. Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad. UNE-EN 14889-2:2008. España: AENOR, 2008.
- [10] Kalifa P, Chéné G, Gallé C. "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres. From spalling to microstructure". *Cement and Concrete Research*. October 2001. Vol. 31–10.p.1487–1499. (doi:10.1016/S0008-8846(01)00596-8)
- [11] Bošnjak J, Ozbolt J, Hahn R. "Permeability measurement on high strength concrete without and with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup". *Cement Concrete Research*. November 2013. Vol.53. p.104–111. (doi:10.1016/j.cemconres.2013.06.005)
- [12] Kalifa P, Menneteau FD, Quenard D. "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures". *Cement Concrete Research*. December 2000. Vol.30–12. p.1915–1927. (doi:10.1016/S0008-8846(00)00384-7)
- [13] Al Qadi A, Al-Zaidyeen S. "Effect of fiber content and specimen shape on residual strength of polypropylene fiber self-compacting concrete exposed to elevated temperatures". *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. January 2014. Vol. 26–1. p.33–39. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2012.12.002>)
- [14] MINISTERIO DE FOMENTO. Instrucción para el hormigón estructural (EHE-08). Con comentarios de la Comisión Permanente del Hormigón. Madrid: 2010
- [15] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes. UNE-EN 12390-1:2013. España: AENOR, 2013
- [16] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia. UNE-EN 12390-2:2009. España: AENOR, 2009
- [17] AENOR. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas. UNE-EN 12390-3:2009. España: AENOR, 2009
- [18] ISO 834-1:1999, Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction –Part 1: General Requirements, 2015
- [19] AENOR, UNE-EN 1363-1: 2012, Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales, AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España, 2012
- [20] AENOR, UNE-EN 1363-2:2000, Ensayos de resistencia al fuego. Parte 2: Procedimientos alternativos y adicionales, AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España, 2000
- [21] AENOR, UNE-EN 1365-4:2000, Ensayos de resistencia al fuego de los elementos portantes. Parte 4: Pilares, AEN/CTN 23 – Seguridad contra incendios, España, 2012