

EFFECTO DE LAS FIBRAS DE POLIPROPILENO EN EL DESPRENDIMIENTO EXPLOSIVO DEL HORMIGÓN

Francisco Hours¹, María Celeste Torrijos², Graciela Giaccio³, Raúl Zerbino²

¹ LEMIT-CIC, La Plata, Argentina, franciscohours@gmail.com

² CONICET, LEMIT-CIC, Fac. de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina

³ LEMIT-CIC, Fac. de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina

RESUMEN

Cuando el hormigón es expuesto a altas temperaturas en forma acelerada se produce un fenómeno de desprendimiento explosivo o *spalling* que se caracteriza por la expulsión violenta de fragmentos del material. Se ha comprobado que la incorporación de fibras poliméricas en el hormigón permite mitigar dicho efecto. Sin embargo, merecen mayor estudio la definición de la dosis necesaria y la influencia de las características de las fibras. El objetivo de este estudio experimental es contribuir al respecto evaluando la respuesta frente a temperaturas elevadas de hormigones con micro y macrofibras sintéticas. Se elaboraron cilindros de 150x300 mm con distintas dosis de fibras que fueron expuestos a temperaturas de 500 y 700 °C. Tanto el uso de micro como de macro fibras impidió desprendimientos violentos de hormigón. La incorporación de microfibras, aún en dosis de 1 kg/m³, resultó altamente beneficiosa en el control de la fisuración por altas temperaturas.

Palabras claves: hormigón reforzado con fibras, microfibras sintéticas, macrofibras sintéticas, altas temperaturas, spalling.

INTRODUCCIÓN

El desprendimiento explosivo o *spalling* se reconoce dentro de la literatura como una de las principales causas de compromiso estructural en caso de incendio, las estructuras afectadas pueden sufrir una pérdida de sección e incluso quedar expuestas al fuego las armaduras. Los principales factores que influyen sobre el grado de deterioro son la permeabilidad del hormigón, el nivel de saturación de agua inicial, la velocidad de calentamiento y la resistencia a tracción del hormigón, junto con el tamaño de la sección [1]. Los túneles al tener un mayor porcentaje de humedad que otras construcciones poseen un mayor riesgo de sufrir desprendimientos explosivos. Cuanto mayor es la resistencia del hormigón menor es su permeabilidad lo que aumenta el riesgo de *spalling*. En este sentido el Hormigón de Alta Performance (HAP) merece especial consideración debido a que es un hormigón con baja razón a/c, elevados contenidos de cemento y que incorpora adiciones minerales, lo que resulta en un material más denso y considerablemente menos permeable que el hormigón convencional.

Se distinguen principalmente dos mecanismos que, durante el calentamiento en el hormigón, pueden generar *spalling*: uno termo-hidráulico y otro termo-mecánico [1-3]. El primero consiste en un rápido ascenso de la presión de poros debido a la evaporación del agua. Cuando aumenta la presión de vapor en el interior de los poros del hormigón y supera su resistencia a tracción se produce el desprendimiento explosivo. Una baja

permeabilidad o un alto contenido de humedad del hormigón dificulta la liberación de esta presión. Algunos autores [2] indican que el *spalling* se produce a temperaturas entre 190 y 250 °C. Otros autores [4] indican que la deshidratación de los productos de hidratación a temperaturas entre 400 y 500 °C y la calcinación del CaCO₃ de los agregados calcáreos (600-900 °C) también influyen en el incremento de la presión de poros. El segundo proceso involucrado es el termo-mecánico que consiste en un estrés térmico cerca de la superficie expuesta debido al gradiente de temperatura. La expansión restringida por el aumento de temperatura genera tensiones de tracción en el interior del hormigón que está más frío. Estos mecanismos pueden ocurrir individualmente o combinados.

Una de las medidas de protección contra el desprendimiento explosivo es el uso de fibras de polipropileno. En la norma europea [5] se recomienda el uso de 2 kg/m³ de fibras poliméricas monofilamento para minimizar el riesgo de desprendimiento explosivo de HAP. Sin embargo, se han encontrado que dosis de 0,9 kg/m³ han sido efectivas [2]. Según Khoury [1] las microfibras monofilamento de polipropileno estabilizadas contra la oxidación y recubiertas con un agente dispersante que permite una buena dispersión durante el moldeo representan el tipo de fibra más efectivo para combatir el desprendimiento explosivo.

También se ha discutido en relación al mecanismo de acción de las fibras poliméricas que lleva a contrarrestar el *spalling*. Las fibras al fundirse generan un sistema de canales interconectados que permiten aliviar las presiones de vapor. En este sentido, Heo et al. [6] consideran que la efectividad del transporte de vapor es independiente del diámetro de las fibras, pero no de su longitud y número, cuanto más fibras se incorporen habrá más vías interconectadas por donde escapar el vapor. Estas vías de escape del vapor pueden ser los canales que dejan las fibras al fundirse o evaporarse y las microfisuras que se generan en las interfases fibra-matriz.

Las fibras poliméricas en general se funden cuando la temperatura alcanza aproximadamente 170 °C, sin embargo, algunos autores afirman que las fibras deben gasificarse para crear canales [7]. Antes que el polipropileno comience a fundirse la debilidad de las interfases entre las fibras y la matriz favorece su fisuración, permitiendo el escape del vapor de agua [8]. Para estos autores debido a la elevada viscosidad del polipropileno fundido, su poca afinidad con el hormigón y la pequeña estructura de poros del mismo no es posible que el polipropileno se absorba en la matriz para crear los canales. A la vez afirman que las fibras se compactan en la dimensión radial producto de la elevada presión de vapor por encima de los 100 °C dando lugar a espacios tangenciales para la liberación de humedad. La efectividad del mecanismo parece estar influenciado por el área superficial y la conectividad de las fibras. Al seguir aumentando la temperatura, por encima de 350 °C las fibras fundidas comienzan a volatilizarse y a 475 °C se habrá producido su total vaporización [1]. Entre 350 y 475 °C los canales dejados por las fibras contendrían tanto fibras fundidas como vapor originado por la volatilización de los hidrocarburos. Sin embargo, Kalifa [2] realizó ensayos de permeabilidad en hormigones con y sin fibras a distintas temperaturas y observó que la mayor diferencia en la permeabilidad entre el hormigón simple y los que tenían fibras se daba a una temperatura de 200 °C, a temperaturas mayores a 400 °C las diferencias disminuían. Concluyó que a 200 °C, temperatura en la cual las fibras están fundidas, el incremento en la permeabilidad se debe a que las fibras son absorbidas por la matriz. Para corroborar esto realizó una prueba donde colocó fibras de polipropileno sobre una superficie de hormigón y las cubrió con un cubo de hormigón. Posteriormente calentó la muestra hasta 170 °C, una vez frío, retiró el cubo superior y colocó una gota de agua en el lugar donde se habían dispuesto las fibras, la gota permanecía en su lugar, indicando que el polipropileno fundido había impermeabilizado la superficie. A temperaturas mayores a 180 °C la gota fue absorbida por el hormigón, mostrando que el polipropileno al fundirse puede ser absorbido por la matriz.

El polipropileno al fundirse experimenta un aumento de aproximadamente un 7 a 10 % en volumen. Las microfisuras originadas por la expansión del polímero al fundirse también podrían aliviar las presiones de vapor. En este sentido las fibras de mayor diámetro generarían mayores tensiones y una mayor tendencia a que se formen microfisuras. Jansson y Boström [9] compararon el rendimiento de microfibras de 12 mm de largo de dos diámetros diferentes (32 μm y 18 μm) en un estudio sobre paneles. Pudieron observar que el uso de fibras de 32 μm de diámetro proporcionó un rendimiento comparable al de las fibras de 18 μm de diámetro a pesar que éstas son más numerosas en el hormigón. También observaron que los paneles con 1 kg/m^3 de fibra de 32 μm de diámetro dieron resultados levemente superiores a aquellos con 1,5 kg/m^3 de fibra de 18 μm de diámetro. Según este estudio pareciera que no solo el número de fibras en el hormigón determina la efectividad de una fibra para proporcionar resistencia al desprendimiento explosivo.

Como fuera comentado anteriormente, los HAP constituyen un caso particular donde el *spalling* podría ser más crítico. En un estudio [10] sobre el uso combinado de fibras poliméricas (12 mm de longitud) y fibras de acero (13 mm de longitud) en un hormigón con 150 MPa de resistencia a compresión, se observó que si se adicionaba sólo fibras de acero ocurría *spalling*, mientras que con dosis de fibras poliméricas mayores a 2 kg/m^3 el mismo se evitaba, pero aparecían grandes fisuras en la superficie. Mientras que al combinar fibras de polipropileno y de acero los autores encontraron que no sólo se evitaba el desprendimiento explosivo de fragmentos de hormigón, sino que las probetas mantenían su integridad sin aparición de fisuras. Khaliq y Kodur [11] también encontraron que una combinación híbrida de fibras de polipropileno y de acero representó la mejor opción para evitar el *spalling* en hormigones de alta resistencia. Cuando se amplió el Túnel del Canal de la Mancha se realizaron pruebas de incendio sobre losas rectangulares elaboradas con hormigón de alta resistencia. Se evaluaron microfibras monofilamento y microfibras fibriladas de polipropileno junto con fibras de acero, que habían sido especificadas en reemplazo del refuerzo convencional. Se observaron desprendimientos en todas las muestras que no contenían fibras, mientras que la adición de las fibras de polipropileno logró reducir significativamente el riesgo de desprendimiento. Las fibras monofilamentos proporcionaron una mayor resistencia a desprendimientos violentos que las fibriladas mientras que el uso de fibras de acero no aportó ningún beneficio en este sentido [12].

Este trabajo forma parte de un estudio más amplio que tiene por objetivo analizar el grado de protección frente a altas temperaturas que pueden otorgar micro y macrofibras poliméricas en distintas matrices. Se ha probado que las microfibras brindan protección contra el *spalling*, aunque no hay consenso en cuanto a la dosis más adecuada; con las macrofibras son contados los estudios sobre su eficacia en caso de incendio. En este trabajo se presenta un avance del estudio en marcha que incluyen las evaluaciones sobre un hormigón de 30 MPa de resistencia, está previsto el mismo estudio en un hormigón de 50 MPa de resistencia.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este estudio comprende dos tipos de hormigones elaborados en planta, un H30 y un H50, con piedra partida granítica de tamaño máximo 19 mm como agregado grueso. A cada hormigón se le incorporó en el laboratorio 1 y 2 kg/m^3 de microfibras sintéticas de 12 mm de longitud y 0,018 mm de diámetro y 3 y 6 kg/m^3 de macrofibras sintéticas de 50 mm de longitud y 0,6 mm de diámetro. El punto de fusión de ambas fibras se encuentra en torno a los 160 °C. En la Figura 1 se muestran las fibras utilizadas.



Figura 1: Imagen de las fibras utilizadas.

Con cada una de estas 4 mezclas con fibras más la referencia sin fibras, por tipo de hormigón se moldearon 9 cilindros de 150x300 mm. Cada una se identifica con una letra HS (sin fibras), m (con microfibras) y M (con macrofibras) seguida por un número que se corresponde con la dosis (en kg/m^3) de fibras incorporada, y las probetas expuestas a temperatura se les agrega 500 o 700 según la temperatura de exposición.

Todos los cilindros se curaron durante 28 días en cámara húmeda y permanecieron allí hasta la edad de ensayo para mantener un alto nivel de humedad dentro del hormigón. Las probetas se sacaron de cámara 4 días antes de ser expuestas a alta temperatura.

Para evaluar el daño en cada hormigón, antes y después de calentar las probetas, se las pesó y midió la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), una vez calentadas se realizó un relevamiento de la densidad y ancho máximo de fisuras visibles en la superficie de la probeta.

El programa incluye la realización de ensayos de compresión sobre cada cilindro midiendo además de la resistencia residual, los valores del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson de forma de poner en evidencia los efectos de las fibras sobre el desarrollo de fisuración interna.

Exposición a alta temperatura

Las probetas fueron calentadas progresivamente hasta alcanzar temperaturas máximas de 500 o 700 °C en un horno eléctrico con control automático de temperatura. A partir de los 500 °C el silicato de calcio hidratado y el hidróxido de calcio comienzan a deshidratarse dando lugar a pérdidas de resistencia mayores. Temperaturas mayores a 700 °C son comunes en los estudios de incendio.

Como fuera comentado en la introducción la velocidad de calentamiento incide en la severidad del daño, por esto también se midió mediante una termocupla la evolución de la temperatura en el centro de una probeta de hormigón. La Figura 2 muestra como ejemplo las curvas de calentamiento dentro del horno y dentro de la probeta para muestras expuestas hasta 500 °C. Cabe aclarar que esta velocidad de calentamiento es lenta en comparación con las usadas cuando se busca asemejar la acción del fuego. Cuando el horno alcanzó la temperatura máxima (500 o 700 °C) se dejaron las probetas por dos horas a esa temperatura, luego se apagó el horno y las probetas se enfriaron lentamente en su interior.

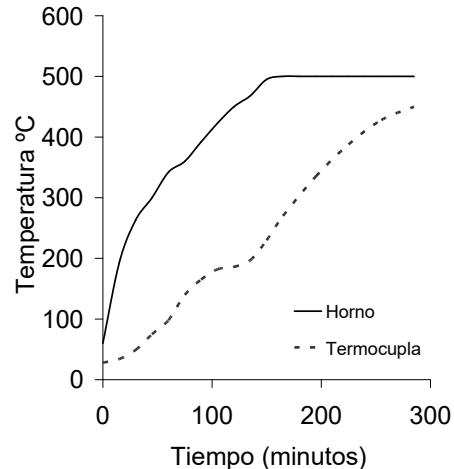


Figura 2: Curvas de calentamiento hasta 500 °C

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran las medidas promedio de peso y de VPU antes y después de la exposición a 500 y 700 °C de temperatura, el ancho máximo de fisura y la densidad de fisuras promedio. Las principales observaciones sobre estos primeros resultados parciales se indican a continuación.

Las probetas de hormigón simple se destruyeron por efecto de las altas temperaturas, aún con la exposición a 500 °C. En las probetas con micro y macrofibras sintéticas la pérdida de peso no fue significativa, un 6 % en las probetas expuestas a 500 °C y entre un 7 y un 8 % en las probetas expuestas a 700 °C. En cambio, la VPU puso en evidencia el daño desigual experimentado a distintas temperaturas y distintos tipo y contenido de fibras incorporadas. Cuando las probetas fueron expuestas a 500 °C las microfibras tuvieron un mejor desempeño, la VPU disminuyó en un 53 y un 55 % en los hormigones con 1 y 2 kg/m³ respectivamente. En los hormigones con 3 kg/m³ de macrofibras la VPU disminuyó 65 % mientras que en el de mayor dosis la VPU disminuyó aún más, un 87 %. A 700 °C de temperatura las probetas de todos los hormigones presentaban un cuadro de fisuración tan extendido que las medidas de VPU no arrojaron resultados. En cuanto al cuadro de fisuración, en las probetas con microfibras se generaron fisuras significativamente más finas que en las muestras con macrofibras. La diferencia fue más notable con la exposición a 700 °C. La bibliografía [6, 8] indica que las microfibras al ser más pequeñas, se incorporan en mayor número dando lugar a una mayor interconexión de los canales que dejan al evaporarse, resultando más eficientes en el alivio de las presiones de vapor. En una próxima etapa cuando se realicen los ensayos de compresión se comprobará el nivel de resistencia y deformabilidad residual de cada hormigón.

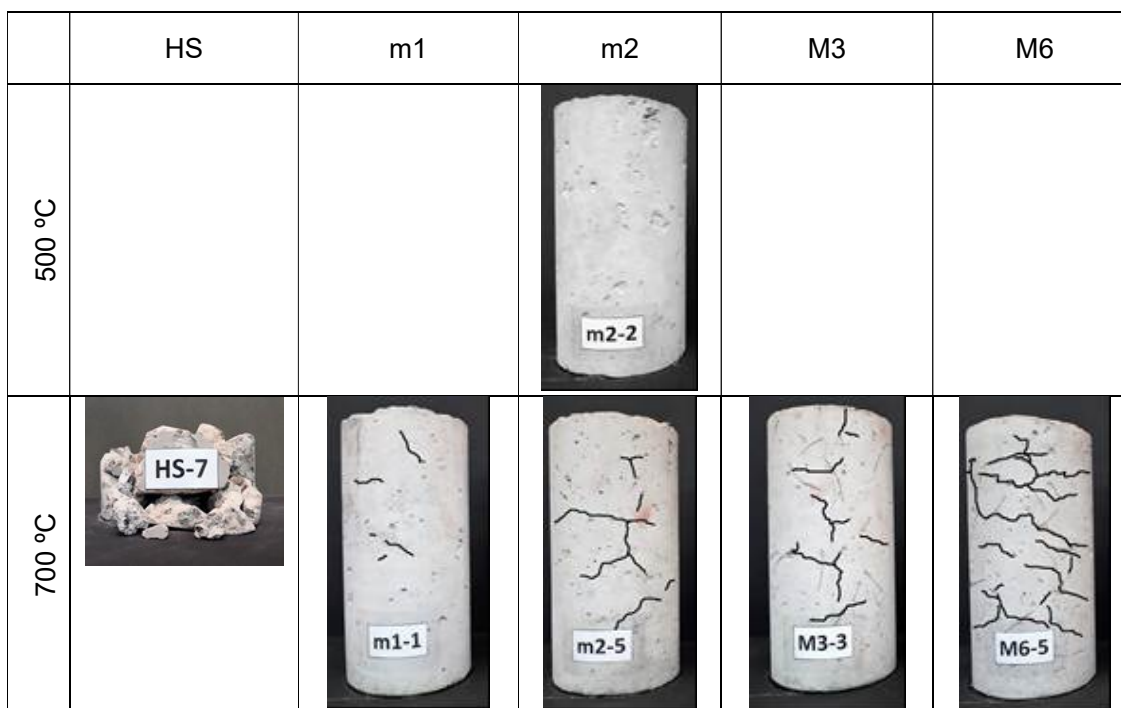
En la Figura 3 se observa el aspecto superficial de las probetas luego de la exposición a 500 y 700 °C. A diferencia de las probetas de hormigón simple que se destruyeron, las probetas con fibras mantuvieron la integridad en todos los casos, tanto a 500 como a 700 °C, y en el caso de las probetas con microfibras se observó una menor fisuración.

En la Figura 4 se puede observar con más detalle el aspecto superficial de hormigones con micro y macro fibras expuestos a 700 °C, se aprecia que las macrofibras al fundirse o al evaporarse dañan la matriz que las rodea y se forman fisuras a partir de los canales que dejan. Queda el interrogante de si esto sucede en una matriz más resistente.

Tabla 2: Peso (P) y velocidad de pulso ultrasónico (VPU) antes y después de la exposición a 500 y 700 °C de temperatura, ancho máximo de fisura.

Hormigón	Tmax °C	Peso		VPU		Fisuras	
		kg	%	km/s	%	Ancho máximo mm	Densidad mm/mm ²
HS		12,9		4,3			
HS 500	500	D	-	D	-		
HS 700	700	D	-	D	-		
M3		12,6		4,2			
M3 500	500	11,8	94	1,5	35	0,090	0,047
M3 700	700	11,7	93	F	-	0,410	0,124
M6		12,7		4,1			
M6 500	500	11,9	94	0,5	13	0,190	0,06
M6 700	700	11,8	92	F	-	0,535	0,204
m1		13,0		4,3			
m1 500	500	12,2	94	2,0	47	0,050	0,007
m1 700	700	12,2	93	F	-	0,250	0,091
m2		13,0		4,2			
m2 500	500	12,2	94	1,9	45	0,095	0,010
m2 700	700	12,1	93	F	-	0,325	0,061

D: probetas destruidas
F: probetas muy fisuradas

**Figura 3:** Aspecto de los cilindros luego de la exposición a altas temperaturas (se resaltan las fisuras visibles).

En síntesis, estos primeros resultados indican que la incorporación de microfibras aún en dosis de 1 kg/m³ resultó más beneficiosa en el control de la fisuración que la incorporación de macrofibras, aunque es de notar que estas últimas aportan otras propiedades al hormigón endurecido, principalmente su capacidad residual que puede aprovecharse en el diseño. Cabe recordar que en muchas ocasiones el uso de fibras no

solo se recomienda para la disposición final del hormigón (por ejemplo en dovelas premoldeadas) sino para las etapas de moldeo, traslado y colocación. En este sentido resulta de interés el uso de combinaciones híbridas de fibras.

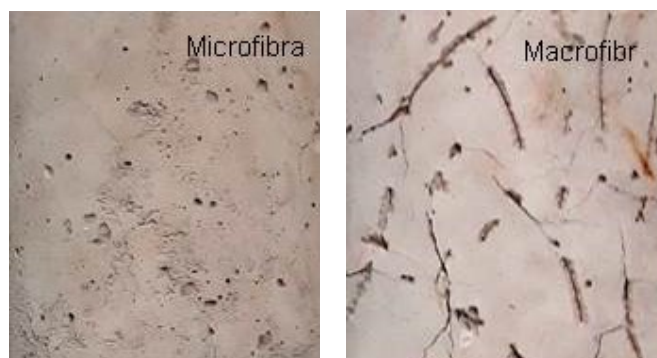


Figura 4: Aspecto superficial de probetas con micro y macro fibras expuestas a 700 °C:

CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se presentan los primeros resultados de un estudio en desarrollo para analizar la contribución de diferentes tipos y dosis de fibras poliméricas para atenuar el daño que sufre el hormigón frente a la exposición a altas temperaturas. Se evaluó la respuesta de un hormigón de 30 MPa de resistencia a compresión considerando los casos de muestras sin fibras, y muestras que incorporan 1 o 2 kg/m³ de microfibras sintéticas y 3 o 6 kg/m³ de macrofibras sintéticas. Tanto el uso de micro como de macrofibras evitó el estallido de las probetas. Sin embargo, la incorporación de microfibras aún en dosis de solo 1 kg/m³ resultó más beneficiosa en el control de la fisuración que la incorporación de macrofibras.

REFERENCIAS

- [1] Khoury G, "Passive fire protection of concrete structures", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings*, 161, Issue SB3, (2008), 135–145
- [2] Kalifa P, "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure", *Cement and Concrete Research*, 31, (2001), 1487–1499.
- [3] Klingsch E "Explosive spalling of concrete in fire", *Doctoral Thesis ETH Zürich, Research Collection*. (2014).
- [4] Varona FB, Baeza FJ, Bru D, Ivorra S, "Evolution of the bond strength between reinforcing steel and fibre reinforced concrete after high temperature exposure", *Construction and Building Materials*, 176, (2018), 359–370.
- [5] EN1992-1-2 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules-Structural fire design. Brussels Comité Européen de Normalisation (CEN), (2004).
- [6] Heo YS, Sanjayan JG, Han CG and Han MC, "Critical parameters of nylon and other fibres for spalling protection of high strength concrete in fire", *Materials and Structures*, 44, (2011), 599–610.
- [7] Schneider U and Horvath J, "Behaviour of ordinary concrete at high temperature", Heft 9, *Technical University of Vienna, Austria*, (2003).
- [8] Khoury G and Willoughby B, "Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behaviour", *Magazine of Concrete Research*, 60, No. 2, (2008), 125–136.
- [9] Jansson R and Boström L, "Experimental Study of the Influence of Polypropylene Fibres on Material Properties and Fire Spalling of Concrete", *3rd International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS)*, Stockholm, Sweden, (2008).
- [10] Li Y, Tan K H, Yang E H, "Synergistic effects of hybrid polypropylene and steel fibers on explosive spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperature", *Cement and Concrete Composites*, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.009>, (2018).

Hours, F et al.

- [11] Khaliq W and Kodur V, "Effectiveness of Polypropylene and Steel Fibers in Enhancing Fire Resistance of High-Strength Concrete Columns", J. Struct. Eng., ASCE, 144 (3), (2018).
- [12] Shuttleworth P, "Fire protection of concrete tunnel linings", Tunnel Management International, Vol 3, (2002).