

Estudio de la conductividad térmica en el hormigón en masa con fibras de polipropileno y acero

Study of thermal conductivity in mass concrete with polypropylene and steel fibers

■■■■■
Rubén Serrano-Somolinos, María-Isabel Prieto-Barrio, Sonsoles González-Rodrigo y José-Antonio López-Medina
Universidad Politécnica de Madrid (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8493>

El hormigón armado es el material estructural más utilizado en construcción, debido a su versatilidad y bajo coste. En el caso de encontrarse sometido a la acción del fuego, al ser incombustible, no aumenta la carga de fuego y además es capaz de asegurar la estabilidad estructural necesaria para evitar el colapso y el consiguiente derrumbamiento de los edificios, sin generar humos ni gases tóxicos. La incorporación de fibras en el hormigón se ha ido implantando cada vez de forma más habitual. La adición de fibras de polipropileno en dosificaciones adecuadas, aumenta su resistencia, mejora su durabilidad, reduce la permeabilidad y la porosidad capilar por efecto del bloqueo de los poros y reduce la fisuración. La incor-

poración de fibras de acero al hormigón mejora su resistencia a flexotracción, la tenacidad a la fractura y el control de la fisuración [1,2].

Cuando el hormigón con fibras de polipropileno se encuentra sometido al fuego y las fibras alcanzan su punto de fusión (170°C), inicialmente el polímero en estado líquido impregna la red capilar para luego degradarse a altas temperaturas, generando una red de canales de gran tamaño interconectados entre sí que actúan como vías de escape por los que se libera el vapor de agua, lo que reduce la presión en los poros y el efecto *spalling* [3]. Cuando el hormigón con adición de fibras metálicas se encuentra sometido a una agresión térmica, se reduce también el agrietamiento y aumenta la absorción de energía [4].

La conductividad térmica es la propiedad física de los materiales que mide la capacidad de transferencia de calor por conducción. Aunque existen investigaciones sobre la conductividad térmica en el hormigón que muestran que se incre-

menta con el aumento de la saturación, la temperatura, la fracción volumétrica y la conductividad térmica del árido y disminuye con el aumento de la relación agua y cemento [5,6], no existen investigaciones que relacionen directamente la conductividad térmica del hormigón con la absorción de calor, entendida como el proceso mediante el que un cuerpo absorbe energía que otro cuerpo a mayor temperatura le cede.

Partiendo de las premisas anteriores, el objetivo del presente estudio es relacionar la conductividad térmica (W/mK) de un hormigón con adiciones y la temperatura alcanzada por un hormigón en una exposición directa a fuego. Para ello se ha utilizado el método de calor lineal transitorio y se ha analizado la influencia de la conductividad térmica (λ), para demostrar cómo esta propiedad física de los materiales influye notablemente en el aumento de temperatura que alcanza la masa del hormigón ante una exposición térmica agresiva. Se han llevado a cabo comparativas con hormigones sin adición y con adiciones de fibras de polipropileno y fibras de acero en diferentes porcentajes en peso de cemento.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se llevó a cabo en dos fases. En primer lugar, se rea-

Cemento	SO ₃	≤ 3,50%	Resistencia a compresión a 28 días	≥ 32,5MPa ≤ 52,5MPa
	Cl ⁻	≤ 0,10%	Expansión (Le Chatelier)	≤ 10mm
	Cromo (VI) soluble en agua	≤ 2ppm	Tiempo inicio de fraguado	≥ 75min
	Resistencia a compresión a 7 días	≥ 16MPa	Tiempo final de fraguado	220min
Arena	Cloruros	≤ 0,005%	Equivalente de arena	≤ 75
	Partículas ligeras	≤ 0,50%	Densidad saturada superficie seca	2549g/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	2711g/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	7,85g/cm ³	Longitud	35mm
	Cantidad	15900 (unidades/kg)	Diámetro	0,54mm
			Relación L/D	65 +/- 15%
Fibras de polipropileno	Densidad	0,91kg/l	Longitud	12mm
	Cantidad	102millones (unidades/kg)	Diámetro	31µm
			Punto de fusión	163 - 170°C

Tabla 1: Características físicas y composición química de los materiales empleados

lizaron probetas cilíndricas de hormigón en masa, a las que se añadieron distintos porcentajes de fibras de polipropileno o de acero, y se sometieron a un ensayo a fuego real, para estudiar la evolución de la temperatura en el hormigón y su comportamiento. En una segunda fase, se realizaron probetas cúbicas, con los mismos porcentajes de fibras de polipropileno o de acero que en las probetas cilíndricas, sobre las que se estudió su conductividad térmica, con el fin de relacionar la conductividad térmica de los materiales con las temperaturas desarrolladas ante un fuego.

1.1. MATERIALES

A continuación se indican los materiales empleados en la fabricación del hormigón y cuyas características físicas y composición química pueden observarse en la Tabla 1:

- "Cemento tipo CEMII/BL 32,5", suministrado por la empresa LAFARGE-HOLCIM.
- Árido fino silíceo lavado, de fracción granulométrica 0-6mm. Los áridos finos empleados provienen de la planta de Allas (Adades-Segovia) que pertenece a la empresa ÁRIDOS SIRO.
- Árido grueso silíceo natural, de fracción granulométrica 4-20mm. Los áridos gruesos empleados provienen de la planta de Allas (Adades-Segovia) que pertenece a la empresa ÁRIDOS SIRO. El tamaño máximo del árido grueso empleado para el ensayo fue de 12mm.
- Agua potable del Canal de Isabel II de Madrid.

Las adiciones utilizadas en el hormigón, están de acuerdo con la Instrucción de Hormigón Estructural [7] y son las siguientes:

- Fibras de acero (Sika Fiber CHO65/35 NB): Son fibras de alambre de acero trellado y con doblez en las terminaciones. Cumplen con la norma ASTM A 820, Tipo 1.

- Fibras de polipropileno (SIKA Sikafiber M-12): Son monofilamentos de polipropileno. Cumple con la norma UNE 14889-2: Fibras poliméricas para hormigón. Clase 1-a: "Microfibra Monofilamentosa".

La dosificación empleada tanto en las probetas cilíndricas como cúbicas es 1:2:3:0,5 (cemento: arena: grava: agua) y con porcentajes de adición de fibras de acero y de fibras de polipropileno del 1% y 2% en peso de cemento, según se muestra en la Tabla 2.

1.2. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS

Se elaboraron probetas cilíndricas de 200mm de altura y 100mm de diámetro para su posterior ensayo a fuego. Para ello, se realizaron tres amasadas de hormigón fresco HM-25. En la primera amasada se procedió a confeccionar tres probetas cilíndricas de hormigón en masa sin adición como muestras de referencia (SA). En la segunda amasada se elaboraron seis probetas con adición de fibra de acero, de las cuales tres se confeccionaron con una dosificación del 1% de fibra de acero sobre el peso de cemento (FA-1%) y las otras tres con adición al 2% (FA-2%). En la tercera y última amasada, se elaboraron otras seis probetas incorporando en este caso fibras de polipropileno, tres de ellas con 1% de adición (PP-1%) y las otras tres restantes con 2% de polipropileno (PP-2%).

Para el ensayo de conductividad térmica, se elaboraron diez probetas cúbicas de 150x150x150mm³. Se fabricó hormigón en masa HM-25, en las mismas condiciones que en las probetas cilíndricas y se añadieron los mismos porcentajes de fibras en peso de cemento (FA-1%; FA-2%; PP-1%; PP-2%).

Los hormigones con fibras se realizaron en una gaveta manualmente, para evitar la formación de erizos y asegurar una buena distribución de las fibras. Los materiales se fueron incorporando en seco en el siguiente orden: grava, cemen-

to, arena y fibras. Cuando los materiales estuvieron homogeneizados, se añadió el agua y se procedió al amasado del hormigón. Una vez confeccionados los hormigones, se rellenaron los moldes en tres tongadas, compactando el hormigón con una barra compactadora de acero, pican-do 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 ± 3°C y una 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 humedad relativa ≥ 95% durante 28 días, para su curado y endurecimiento.

Una vez curadas, a las probetas cilíndricas se las sometió a un ensayo a fuego directo, según los procedimientos de resistencia al fuego de materiales empleados en el Servicio de Prevención y Extinción de incendios de la Comunidad de Madrid y la norma ISO R-834 [8]. Las probetas cúbicas fueron llevadas al laboratorio de I+D+I de la Empresa SIKA S.A.U. para realizar el ensayo de conductividad térmica según la norma ASTM D5334 [9].

1.3. ENSAYO A FUEGO DIRECTO DE PROBETAS CILÍNDRICAS

El ensayo a fuego directo de las probetas cilíndricas se realizó tomando como referencia la norma ISO-R-834 [8]. Se consideró un potencial calorífico similar al valor medio alcanzado en los incendios en edificación, equivalente a 40 kilogramos de madera por metro cuadrado (kg/m²). Para realizar el ensayo se colocaron verticalmente las probetas sobre una parrilla situada sobre una bandeja de ensayo de 1m² de superficie, cargada con 40kg de madera troceada pulverizada con gasolina para favorecer la combustión en origen. Las probetas se situaron de forma aleatoria y de modo que todas las caras de las probetas estuviesen expuestas al fuego. Se tomaron medidas de temperatura en la superficie de las probetas a

Tipo de hormigón	HM-25				
Tipo de aditivo	Sin aditivo (SA)	Fibras de acero (FA-1%)	Fibras de acero (FA-2%)	Fibras de polipropileno (PP-1%)	Fibras de polipropileno (PP-2%)
Cemento (kg/m ³)	230	230	230	230	230
*Arena (kg/m ³)	460	460	460	460	460
*Grava (kg/m ³)	690	690	690	690	690
Agua (l/m ³)	115	115	115	115	115
Adición (kg/m ³)	0	2,3	4.6	2,3	4,6
* Dosificación del árido en estado saturado superficie seca					

Tabla 2: Dosificación de las amasadas empleadas

una distancia de aproximadamente 40 cm durante 1 hora, en intervalos de 15 minutos mediante un termómetro infrarrojo compacto modelo "Testo 845", proveniente del Servicio de Prevención y Extinción de Incendios de la Comunidad de Madrid, que fue donde se llevó a cabo este tipo de ensayo. Pasado el tiempo del ensayo, las probetas se dejaron enfriar lentamente (Fig. 1).



Fig. 1: Ensayo de temperatura a fuego directo

1.4. ENSAYO CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE PROBETAS CÚBICAS

Los ensayos de conductividad térmica se realizaron con el "Dispositivo Decagon" en el laboratorio de I+D+I de la empresa SIKA. En este ensayo se determinó la conductividad térmica de hormigones con adiciones de fibras de polipropileno al 1%-2% y fibras de acero al 1%-2% en peso del cemento. Con la conductividad térmica (λ) se midió la capacidad de conducción del calor.

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 realizó el ensayo.

El procedimiento de ensayo se realizó según la norma ASTM D5334 [9]: Se in-

trodujo la sonda TR-1 en el orificio dejado por la varilla y se mantuvo 15 minutos para que la temperatura de la sonda TR-1 se equilibrase con la temperatura de la probeta. Una vez transcurrido este tiempo, se realizaron las medidas en las probetas de ensayo y cada una de las mediciones se repitió tres veces, de acuerdo con la norma, y calculándose 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.

2. RESULTADOS

La Fig. 2 muestra los cambios y el aspecto exterior de las probetas sometidas al desarrollo completo de un incendio con enfriamiento lento para evitar retracciones en las capas internas del hormigón. A pesar de la elevación de la temperatura hasta máximos en torno a 400°C, no se aprecian variaciones en la coloración del hormigón de modo significativo.

La Tabla 3 muestra los resultados de la conductividad térmica en probetas con y sin adiciones, a una temperatura de 20°C y un 50% de humedad relativa, tomando el procedimiento de ensayo indicado en la norma ASTM D5334 [9] y los resultados obtenidos de realizar un diseño factorial replicado dos veces (two-way), a partir de

los valores de las dos series de probetas ensayadas con cada tipo de fibra y porcentaje. Este estudio permite detectar la existencia de diferencias significativas en la conductividad de las probetas ensayadas atendiendo a dos factores con dos niveles cada uno: tipo de fibra y porcentaje de la misma.

El análisis de los datos recogidos en la Tabla 3 muestra que las probetas reforzadas con fibras de acero presentan valores superiores con significancia estadística para un nivel de confianza del 95% a los de fibras de polipropileno ($P\text{-valor} = 0,004 < 0,05$). Por otro lado, cabe destacar que el menor porcentaje de fibras en ambos tipos de probetas también arroja valores de conductividad estadísticamente superiores para el mismo nivel de confianza ($P\text{-valor} = 0,0129 < 0,05$). Sin embargo, la tabla de ANOVA muestra que no existe una interacción significativa entre ambos factores ($P\text{-valor} = 0,1331 > 0,05$).

3. DISCUSIÓN

En la Fig. 3 se compara el comportamiento de una exposición directa a fuego en las probetas sin adición, con fibras de acero 1%-2% y con fibras de polipropileno 1%-2%, para conocer su conductividad térmica y absorción térmica (absortividad). Se observa que las probetas experimentan un pico de temperatura alrededor de los 400°C después de 45 minutos. La temperatura media experimentada es de $200^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$, mostrándose un proceso de enfriamiento diferente entre hormigones



Fig. 2: Aspecto de las probetas de hormigón con fibras de polipropileno en el ensayo a fuego

Conductividad térmica en distintos tipos de probetas		Datos del análisis de la varianza (ANOVA)					
Probetas	Conductividad Térmica (W/mK)	Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
SA	2,802	A:Tipo de fibra	1,53475	1	1,53475	112,28	0,0004
FA-1%	3,430	B:Porcentaje	0,249924	1	0,249924	18,28	0,0129
FA-2%	2,921	AB	0,0483605	1	0,0483605	3,54	0,1331
PP-1%	2,399	Residuos	0,054677	4	0,0136693		
PP-2%	2,201	Total (corregido)	1,88771				

Tabla 3: Conductividad térmica de las probetas y su estudio estadístico

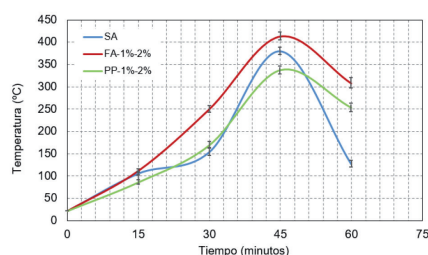


Fig. 3: Comparación de la absorción térmica en probetas con 1%-2% de fibras de acero, con 1%-2% de fibras de polipropileno y en probetas patrón

con y sin fibras. El análisis de los resultados se ha realizado a partir de la media de temperatura obtenida en las distintas probetas de cada tipo. Las probetas con fibras de polipropileno alcanzan menores temperaturas y más lentamente que el resto de probetas, debido a la energía que absorbe la fibra cuando funde y la que desprende cuando se solidifica, reduciendo tanto la velocidad de calentamiento como la de enfriamiento. Las probetas con fibras metálicas alcanzan mayores temperaturas, y con mayor velocidad, que las probetas patrón y que las probetas con fibras de polipropileno y se enfrían más lentamente que las probetas patrón, lo que minimiza la fisuración al disipar el calor lentamente. El enfriamiento en las probetas patrón se produce más bruscamente, lo que provoca tensiones internas que generan fisuraciones importantes.

La gravedad de la exposición a un incendio en un elemento estructural se mide por el área encerrada bajo la curva temperatura-tiempo, que se denomina severidad al fuego. El cálculo de la severidad al fuego muestra su valor más elevado (14440°Cmin) en las probetas con adición de fibras metálicas. Sin embargo, ofrece valores inferiores y parecidos en el caso de hormigones sin adiciones (11217,5°Cmin) y en hormigones con fibras de polipropileno (11490°Cmin). Por tanto, los hormigones con fibra de acero han sufrido la acción del fuego más intensamente que los hormigones sin adición o con fibras de polipropileno. Los valores similares de severidad al fuego entre los hormigones sin fibras y con fibras de polipropileno son debidos a que los hormigones con fibras de polipropileno alcanzan temperaturas menores. Al ser su proceso de enfriamiento más lento, el área bajo la curva temperatura-tiempo se ve compensada con la mayor temperatura que alcanza el hormigón sin fibras, con un enfriamiento mucho más rápido, que favorece la fisuración en el hormigón.

El análisis conjunto de los resultados de la conductividad térmica (Tabla 3) y del ensayo a fuego directo (Fig. 3) permite

observar que los hormigones con fibras de polipropileno poseen un comportamiento muy regular frente a la acción del fuego. En ellos el proceso de calentamiento y enfriamiento es lento y paulatino y la temperatura máxima alcanzada es menor, lo que se corresponde con los hormigones con menor valor de conductividad térmica, debido al pequeño coeficiente de conductividad térmica de las fibras de polipropileno (0,1-0,22).

Las temperaturas máximas alcanzadas en el hormigón con fibras de acero son mayores que en los hormigones sin adiciones o con fibras de polipropileno, debido al mayor coeficiente de conductividad térmica. Sin embargo, la conductividad del hormigón no se incrementa con una mayor cantidad de fibras metálicas, ya que un aumento en el volumen de fibras genera mayor porosidad en la masa, lo que reduce la conductividad térmica del mismo [10].

En las probetas sin adición, las temperaturas máximas alcanzadas son intermedias entre las producidas en el hormigón con fibras metálicas y con fibras de polipropileno, lo que se corresponde con un valor de la conductividad térmica intermedio entre los hormigones con ambos tipos de fibras.

4. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados permite concluir:

- La incorporación de fibras de polipropileno al hormigón disminuye su conductividad térmica y su velocidad de transferencia de calor.
- Aunque la severidad al fuego es similar en el hormigón sin fibras que en el hormigón con fibras de polipropileno, la temperatura alcanzada en el hormigón sin fibras es mayor y su proceso de enfriamiento más rápido. La severidad al fuego del hormigón con fibras metálicas es mayor que en hormigones sin fibras o con fibras de polipropileno.
- El hormigón con adición de fibras de acero absorbe más temperatura debido a la mayor conductividad térmica de las fibras durante los primeros minutos de un incendio, retrasando el paso de calor a la masa cementicia y por tanto, evitando el agrietamiento por diferencia de temperatura del hormigón.
- El aumento de la cantidad de fibras de acero añadidas al hormigón no mejora la conductividad térmica del mismo.

- Los hormigones que incorporan fibras de polipropileno o de acero y se encuentran sometidos a una agresión térmica, se enfrían más lentamente que los hormigones sin adiciones, lo que evita la fisuración producida por un enfriamiento rápido.

AGRADECIMIENTOS

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

PARA SABER MÁS

- [1] 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>
- [2] Sánchez JL, Cobo A, Díaz B, Mateos I. "Experimental study of performance self-compacting concrete reinforced with steel fibers". Anales de Edificación. 2015. Vol.1-2. p.17-26. <https://doi.org/10.20868/ade.2015.3100>
- [3] Noumowe A. "Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °C". Cement and Concrete Research. 2005. Vol.35-11. p.2192-2198. <https://doi.org/j.cemconres.2005.03.007>
- [4] Kim J, Lee GP, Moon DY. "Evaluation of mechanical properties of steel-fibre reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test". Construction and Building Materials. 2015. Vol. 79. p.182-191. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.042>
- [5] Zhang W, Min H, Gu X, Xi Y, Xing Y. "Mesoscale model for thermal conductivity of concrete". Construction and Building Materials 2015. Vol. 98. p.8-16. (doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.106). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.106>
- [6] Kim KH, Jeon SE, Kim JK, Yang S. "An experimental study on thermal conductivity of concrete". Cement and Concrete Research. 2003. Vol.33-3. p.363-371. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00965-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00965-1)
- [7] Ministerio de Fomento. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). Con comentarios de la Comisión Permanente del Hormigón. Madrid: 2010.
- [8] AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). ISO 834-11:2014. Fire resistance tests -- Elements of building construction -Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements, 2014.
- [9] ASTM. Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. ASTM D5334. 2014.
- [10] Nagy B, Nehme SG, Szagri D. "Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes". 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015. Energy Procedia. 2015. Vol.78. p. 2742-2747 <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.616>