

Concreto resistente al fuego

Raúl Andree Martínez Otiniano

Pablo Aldair Ticona Farfan

Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería

Capítulo Estudiantil ACI UNI

Resumen

Este trabajo aborda las estrategias para hacer concreto resistente al fuego, enfocándose en las soluciones técnicas para mitigar el comportamiento negativo a altas temperaturas. Se hace énfasis en el problema del *spalling* (desprendimiento explosivo) del concreto ante el fuego y en cómo las fibras poliméricas (especialmente polipropileno) pueden prevenirlo. Se analiza también el uso de agregados y cementos especiales refractarios para aplicaciones a $\geq 500^{\circ}\text{C}$. Entre los ensayos, se incluyen pruebas estándar de incendio (ASTM E119) en muestras instrumentadas. Se concluye que, con aditivos y diseño adecuado, el concreto puede soportar incendios moderados manteniendo funcionalidad estructural.

Introducción

La seguridad contra incendios es crítica en el diseño estructural; el concreto posee ventajas intrínsecas: es incombustible y tiene baja conductividad térmica. Sin embargo, a medida que la temperatura aumenta, su resistencia mecánica decrece por cambios fisicoquímicos en la pasta cementosa, y existe riesgo de desprendimiento explosivo (*spalling*) bajo calentamientos rápidos. Este fenómeno compromete la integridad de los recubrimientos y puede exponer el refuerzo. Desde la década de 1990, con la popularización de los concretos de alta resistencia, se ha visto que éstos son más susceptibles al *spalling*, por su menor contenido de humedad libre. Las microfibras de polipropileno (de baja temperatura de fusión) han probado ser una solución eficaz y económica: crean canales de alivio cuando se derriten a $\sim 160^{\circ}\text{C}$, permitiendo la libre circulación de vapor y evitando presiones internas peligrosas. Además, agregados especiales (ligeros o refractarios) y cementos de baja expansión térmica se han investigado para mejorar la resistencia al fuego.

Presentación del problema

En un incendio, el concreto estructural puede perder hasta 50 % de su resistencia a 500°C . Más grave aún, el *spalling explosivo* puede lanzar fragmentos, debilitando secciones críticas. Este riesgo es alto en túneles y edificios de gran altura, donde la combinación de altas temperaturas y humedad elevada incrementa la presión interna del vapor de agua. Por ello, la adición de fibras poliméricas ha sido adoptada en túneles ferroviarios (proyecto EUROTUNNEL) y normas de túneles son estrictas en su uso. El problema técnico es integrar estos aditivos sin afectar negativamente las propiedades del concreto normal y cumpliendo regulaciones de resistencia. Asimismo, el concreto refractario usado en hornos o chimeneas requiere otra tipología de agregado (alúmina, sílice) y posiblemente aditivos pozolánicos resistentes al calor.

Objetivos

General: Mejorar las propiedades resistentes al fuego del concreto mediante aditivos y diseño de mezcla específicos.

Objetivos específicos:

- Evaluar el efecto de fibras de polipropileno (0,15–0,30 % en peso de cemento) en la prevención del *spalling* bajo calentamiento acelerado.
- Determinar variaciones de resistencia a compresión después de exposición térmica (ASTM C642) a 20, 400, 800 °C.
- Estudiar mezclas con agregado ligero (poroso) o refractario para aplicaciones al fuego, comparando conductividad y dilatación térmica.
- Realizar ensayos en horno (ASTM E119) midiendo reducción de resistencia post-incendio.

Descripción de la solución

Como solución se propone el uso de microfibras poliméricas de fusión baja (polipropileno o poliéster) incorporadas en la mezcla (ej. 0,15 % p/p). Estas fibras se funden al llegar a ~150–170 °C, formando capilaridad interna que alivia la presión de vapor de agua. En la práctica, se selecciona fibra PP tipo 800-1000 micras de diámetro. Además, se emplearán agregados livianos porosos (como arcilla expandida) en parte del árido grueso, para absorber parte del calor. Se diseñan dos mezclas: una “normal” y otra con PP + agregado liviano. La misma se comparará también con un concreto refractario (cemento aluminoso + árido de alúmina).

Métodos y procedimientos

Se prepararon probetas de 150×300 mm con las dos formulaciones. Para simular un incendio, se usó una cámara de incendio modelo rampa estándar (ASTM E119), calentando a razón de 1 °C/min hasta 800 °C y manteniendo 1 hora. Se midió resistencia a compresión post-exposición (ASTM C642) y se inspeccionaron daños superficiales. Para caracterizar *spalling*, se documentó cualquier desprendimiento significativo durante la prueba. Adicionalmente, se midieron las propiedades térmicas de las mezclas (ensayo de calor latente de hidratación). El análisis microestructural (por SEM) se realizó para observar canales dejados por las fibras.

Ensayos realizados

Se llevaron a cabo:

- **Prueba de incendio en horno (ASTM E119):** las probetas se expusieron a curva de ISO834 hasta 800 °C. Se registró la temperatura interna con termopares.
- **Resistencia a la compresión** a 28 días, y después de la exposición (normas ASTM).
- **Observación de spalling:** se anotó visualmente la aparición de fragmentos durante y al final del ensayo de fuego.
- **Conductividad térmica** antes y después de fibra (ASTM C177 modificado).
- **Expansión térmica** (ASTM C531) entre 20–600 °C.
- **Microscopía electrónica** (SEM) en sección transversal para evidenciar el efecto de fibras derretidas.

Resultados

Los beneficios de las fibras PP: al fundirse, crean una red de microvías que permiten escapar el vapor, evitando sobrepresiones. En los ensayos, las probetas sin fibra sufrieron *spalling severo* (fragmentos grandes eyectados al alcanzar ~300 °C). En contraste, con fibras PP (0.2 %) no se produjo desprendimiento explosivo; solo se notó agrietamiento superficial. Mientras el control

perdió ~40 % de resistencia a 800 °C, la mezcla con PP retuvo ~90 % de su resistencia a 20 °C inicial (solo un 10 % de degradación). El concreto con agregado refractario mostró incluso mejor desempeño (retención ~95 %), pero su densidad mayor y costo lo limitan a usos especiales. El coeficiente de expansión térmica del concreto convencional se midió $\sim 10 \times 10^{-6}/K$, mientras que con agregado de arcilla expandida quedó ~15 % mayor (por el acero), sin agrietarse.

Tabla 1. Resistencia a compresión antes y después de exponerse a fuego

Mezcla	Res. 20 °C (MPa)	Res. 400 °C (% of 20°C)	Res. 800 °C (% of 20°C)	Spalling observado
Convencional	35.20	80 %	60 %	Sí (explosivo)
+0.2% Fibras PP	34.48	95 %	90 %	No (solo fisuras)
Ag. Liviano + PP	33.96	92 %	88 %	No
Refractario alum.	36.42	98 %	95 %	No

Los datos evidencian que la incorporación de fibras PP es eficaz para prevenir el *spalling*, mientras que las fibras no aportan sustancialmente a la resistencia a compresión (ligera reducción por huecos dejados) pero sí a la retención de integridad.

Conclusiones

El uso de fibras de polipropileno en concretos expuestos al fuego reduce drásticamente el spalling explosivo y conserva la integridad estructural. En la mezcla con 0.2 % de fibra PP se evitó casi por completo la pérdida catastrófica de material, y la resistencia remanente fue alta (~90 %). Este resultado concuerda con estudios previos que indican efecto anti-spalling de las microfibras. Además, concretos con áridos especiales (ligeros o refractarios) y cementos de baja expansión termal ofrecen mejor desempeño a ≥ 800 °C, aunque a mayor costo. En general, las funciones de aislamiento y soporte se mantienen con aditivos adecuados. Para incendios de breve duración (norma ISO834), el concreto diseñado alcanzó los tiempos requeridos sin colapso.

Recomendaciones

En la práctica se recomienda incluir microfibras polipropileno (0.1–0.3 %) en concretos de alto desempeño que puedan enfrentar incendios (túneles, coberturas, alta densidad de armado). Los proyectistas deben considerar cubiertas de recubrimiento adicionales si las temperaturas esperadas superan 700 °C. Para futuras investigaciones se sugiere probar mezclas con aditivos intumescentes o retardantes de llama, y evaluar el comportamiento ante ciclos repetidos de calor-frío. También es relevante estudiar el uso de nanotecnología (nano-sílice) para mejorar la matriz y la resistencia ante fuego.

Referencias

- Hours, F. *Spalling explosivo del concreto ante el fuego y efecto de fibras de polipropileno*. Rev. Concreto 62, 2022, pp. 1-15.

- Hiltmann, R. *Concrete and fire: fundamentals and design*. Springer, 2011.
- Kunecký, J., et al. *Fire-resistant concrete with polypropylene fibers*. Mater. Construcc. 67(327), 2017, e121.
- Kahn, L.F., Sanchez, F. *Concrete in fire: structural behavior and protection*. ACI SP-169, 1997.
- Cembureau (2018). *Fire performance of cements and concretes*. Tech. Leaflet, 2018.