

Mecanismos de desprendimiento explosivo del hormigón bajo fuego y el efecto de las fibras de polipropileno. Estado del conocimiento.

F. Hours^a

^aComisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, CP 1900, La Plata, Argentina. franciscohours@gmail.com

Recibido: 17 de febrero de 2022

Aceptado: 1 de agosto de 2022

RESUMEN

El hormigón expuesto a un calentamiento acelerado puede experimentar un fenómeno de desprendimiento explosivo o spalling que se caracteriza por la expulsión violenta de fragmentos del material. Estos desprendimientos pueden comprometer la integridad estructural del elemento. La seguridad estructural contra incendios es una de las consideraciones más importantes en el diseño de las estructuras de hormigón. Está demostrado que la incorporación de fibras poliméricas en el hormigón permite mitigar dicho efecto. En este artículo se realizó una revisión bibliográfica de los mecanismos que conducen a un desprendimiento explosivo durante el calentamiento del hormigón y como la incorporación de fibras de polipropileno puede resultar una solución efectiva y económica a este problema.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras, altas temperaturas, desprendimiento explosivo, fibras de polipropileno

ABSTRACT

Concrete exposed to accelerated heating can experience an explosive spalling phenomenon characterized by the violent expulsion of fragments of the material. These explosive spalling can compromise the structural integrity of the element. Structural fire safety is one of the most important considerations in the design of concrete structures. It has been proven that the incorporation of polymeric fibers in concrete mitigates this effect. This article is a bibliographic review of the mechanisms that lead to explosive spalling during concrete heating and how the incorporation of polypropylene fibers can be an effective and economical solution to this problem.

KEYWORDS: Fiber-reinforced concrete, high temperatures, explosive spalling, polypropylene fibers

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Hours, F. (2022). Mecanismos de desprendimiento explosivo del hormigón bajo fuego y el efecto de las fibras de polipropileno. Estado del conocimiento. Revista Hormigón, 62, 25–39. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/2mhcrto45>

1. Introducción y relevancia del uso de fibras de polipropileno

La seguridad estructural contra incendios es una de las consideraciones más importantes en el diseño de obras de ingeniería de gran envergadura como túneles o edificios de gran altura [1]. El comportamiento del hormigón ante la acción de agentes agresivos ha sido objeto de estudio en las áreas de tecnología y durabilidad del hormigón.

Frente a otros materiales, el hormigón presenta ventajas en un incendio, pues es incombustible en comparación con la madera y también es un buen material aislante que posee una baja difusividad térmica en comparación con el acero. Sin embargo, existen dos problemas del hormigón ante el fuego: el deterioro de las propiedades mecánicas a medida que aumenta la temperatura, causado por cambios fisicoquímicos en el material durante el calentamiento; y el desprendimiento explosivo, que da como resultado la pérdida de material, la reducción del tamaño de la sección y la exposición del acero de refuerzo a temperaturas excesivas [2,3]. En consecuencia, las funciones de aislamiento y de soporte de carga del elemento de hormigón podrían verse comprometidas.

En la década de 1990 el desarrollo de los hormigones de alta resistencia (HAR) resultó una innovación importante que permitió reducir las dimensiones de los elementos estructurales y además lograr una excelente capacidad para sobrellevar condiciones ambientales agresivas, dando lugar a sustanciales mejoras en la durabilidad. Una restricción a su uso generalizado es la preocupación por su comportamiento frente al fuego, en particular su mayor susceptibilidad al desprendimiento [4]. Sin embargo, se comprobó que la incorporación de microfibras de polipropileno en el hormigón puede reducir significativamente, o incluso eliminar, el desprendimiento explosivo [5].

En los túneles existe un mayor riesgo de que se produzcan desprendimientos explosivos durante un siniestro, dada la alta humedad relativa y su naturaleza confinada, en

comparación con los edificios. Los incendios de túneles se describen por escenarios de inflamación de hidrocarburos (en donde la carga de fuego proviene del combustible de los vehículos o del transporte de materiales inflamables) por lo que resultan más severos que los incendios de edificios, los cuales se describen por escenarios de combustión de materiales de clase celulosa (ISO 834) [6,7]. Además de la pérdida de vidas humanas, los daños sufridos en las estructuras de los túneles pueden causar grandes interrupciones y enormes pérdidas económicas debido a la suspensión del uso del mismo y los altos costos de reparación. Después de los incendios del Channel Tunnel (1996), el Kaprun Tunnel (2000) y el incendio del Gotthard Tunnel (2001), fue necesario centrar aún más el estudio en la protección estructural contra incendios de los revestimientos de hormigón (Fig. 1). Los resultados de las investigaciones indicaron que en estos casos se habían producido severos daños debido al desprendimiento marcado del hormigón, motivando ello, posteriores investigaciones vinculadas a la integridad estructural de los revestimientos de hormigón después de un potencial incendio [8-12].

Al planear la extensión del Channel Tunnel Rail Link (CTRL) a Londres, los diseñadores encargaron una investigación detallada sobre el hormigón con microfibras de polipropileno. El programa de pruebas para el proyecto CTRL fue diseñado para simular los efectos de un incendio en un revestimiento in situ al exponer las muestras a una carga de fuego de un solo lado. El objetivo era obtener datos sobre la predisposición al desprendimiento explosivo y la medición de las propiedades térmicas y mecánicas durante y después de la exposición al fuego. Las pruebas iniciales se desarrollaron sobre losas rectangulares sometidas a la curva de incendio según norma ISO 834. Fueron evaluadas dos clases de microfibras de polipropileno: microfibras monofilamento y microfibras fibriladas, en adición a las fibras de acero, las cuales se habían especificado con anterioridad en reemplazo del refuerzo convencional. El estudio mostró desprendimientos en todas las



Figura 1. a) Incendio en Channel Tunnel, Reino Unido – Francia, 1996 [8]. b) Incendio en Kaprun Tunnel, Austria, 2000. c) Incendio en Gotthard Tunnel, Suiza, 2001 [8].

muestras que no contenían fibras, mientras que la adición de las fibras de polipropileno logró reducir significativamente el riesgo de desprendimiento. También se probó que las fibras monofilamentos proporcionaron mayor resistencia al desprendimiento que las fibriladas y que la adición de fibras de acero no tuvo ningún efecto beneficioso como refuerzo ante los desprendimientos. Se llevó a cabo una segunda ronda de pruebas con la mezcla propuesta para el revestimiento del Tunnel North Downs que forma parte de una de las secciones del CTRL y que se encontraba en construcción. Para esta serie de pruebas se utilizó la curva de incendios de hidrocarburos, la cual es más severa. Estas pruebas también compararon el rendimiento

de dos microfibras de polipropileno monofilamento de $18\ \mu\text{m}$ y $32\ \mu\text{m}$ de diámetro, en dosis de 1 y $2\ \text{kg/m}^3$. Todas las muestras se desempeñaron bien en las pruebas sin evidencia de desprendimiento explosivo, a excepción de las muestras de control sin fibras que sufrieron extensos daños (Fig. 2), confirmando los resultados obtenidos en el programa de prueba inicial.

Finalmente se realizó una prueba única a escala real de los segmentos del CTRL. En este caso se utilizó un escenario de incendio muy severo, representado por la curva de incendio de hidrocarburos RWS. Nuevamente se evaluó la eficiencia de las fibras de polipropileno monofilamento, de $18\ \mu\text{m}$ y



Figura 2. Losas rectangulares luego de la prueba de fuego para el Channel Tunnel Rail Link. Izquierda: sin fibras; derecha: con microfibras de polipropileno [13].

32 μm de diámetro, en una dosis de 1 kg/m^3 . Los resultados permitieron corroborar que la incorporación de microfibras de polipropileno logró minimizar el riesgo de desprendimientos explosivos incluso en las condiciones más severas de prueba [13]. Posteriormente, el proyecto CTRL se convirtió en el primer gran proyecto de túneles del mundo en incorporar microfibras de polipropileno para proporcionar resistencia al desprendimiento explosivo.

Luego del incendio del Gotthard Tunnel, y lo sucedido con el CTRL, se decidió crear un programa especial con el propósito de estudiar las medidas constructivas a adoptar en caso de un potencial incendio. Entre las alternativas evaluadas, los diseñadores decidieron estudiar la inclusión de microfibras de polipropileno y evaluar el comportamiento

en las pruebas de incendio (Fig. 3). En 2004 se decidió la protección de las secciones más sensibles del sistema de túneles con un revestimiento de hormigón que incluía 2 kg/m^3 de estas fibras [14].

2. Desprendimiento explosivo del hormigón (spalling)

El “spalling” es un fenómeno físico que se caracteriza por el desprendimiento de capas o pedazos de hormigón del elemento y ocurre en los elementos de hormigón cuando son expuestos a un calentamiento acelerado, como puede suceder en una estructura afectada por un incendio. El alcance, la gravedad y la naturaleza de su ocurrencia

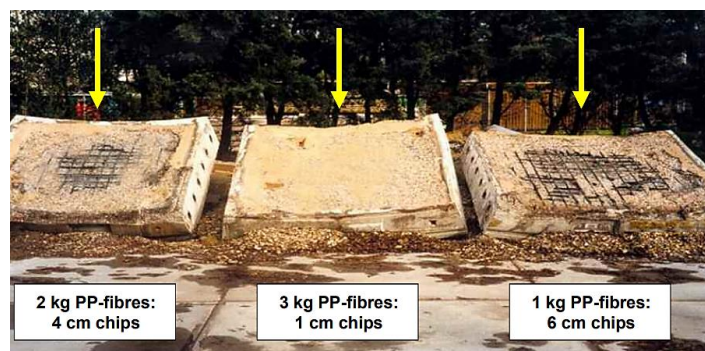


Figura 3. Pruebas de fuego para el Gotthard-Base Tunnel [14].

pueden ser muy variables e impredecibles, desde la aparición de pequeños vacíos superficiales a grandes desprendimientos de hormigón, con la consiguiente exposición de la armadura y reducción de su capacidad estructural, dando lugar a un posible colapso estructural. Los principales factores que influyen son la permeabilidad del hormigón, el nivel de saturación de agua inicial, la velocidad de calentamiento y la resistencia a la tracción, además de la geometría de la sección [15]. El hormigón de alta resistencia merece especial consideración debido a que posee una muy baja razón a/c , incorpora adiciones minerales y elevados contenidos de cemento, lo que resulta en un material más denso y por ende considerablemente menos permeable que el hormigón convencional. Esta propiedad propicia la aparición de un desprendimiento explosivo debido a que dificulta la salida del vapor de agua, haciendo que aumente la presión de vapor en el interior de los poros del hormigón hasta que se produce el desprendimiento explosivo cuando dicha presión supera la resistencia a tracción del hormigón [16-18].

En una estructura se pueden producir diferentes clases de spalling: superficial, de esquina, explosivo, del agregado, por delaminación, post enfriamiento, en función de los siguientes factores: la edad, la resistencia y permeabilidad del hormigón, la aplicación de cargas y restricciones, tipo y tamaño del agregado, la presencia de fisuras, la presencia de armaduras, mallas, el espesor del recubrimiento de las mismas, la incorporación de fibras o microfibras de acero y polipropileno y la incorporación intencional de aire en el hormigón.

2.1 Teorías

Para poder entender los mecanismos que desempeñan las fibras de polipropileno, es importante entender primero cuáles son los mecanismos que conducen a un desprendimiento explosivo en el hormigón durante el calentamiento.

Si bien no se sabe en detalle qué causa los desprendimientos y se reconoce que es un

fenómeno difícil de comprender, en la bibliografía existe una gran variedad de explicaciones y modelos presentados [19,20].

Existen principalmente dos mecanismos: el termo-hidráulico (Fig. 4) y el termo-mecánico (Fig. 5). Estos mecanismos diferentes, pueden ocurrir individualmente o combinados y se analizan a continuación.

2.1.1 Desprendimientos explosivos inducidos por presión de poro

Este tipo de desprendimiento se produce debido a que la humedad dentro del sistema de poros del hormigón se expande con el aumento de la temperatura. Para temperaturas superiores a 100 °C, el agua está presente dentro del sistema de poros como líquido y vapor. En estas condiciones, la presión se acumula según el grado de saturación de poros y la temperatura, parte de este vapor se libera a través de los poros de acuerdo con la permeabilidad del hormigón. La presión en los poros aumentará mientras haya suficiente humedad disponible, induciendo tensiones en el hormigón que conducirán a desprendimientos.

En la literatura, se pueden encontrar diversos modelos que intentaron explicar el desprendimiento explosivo inducido por la presión de poro [21-24]. Hasta el momento el modelo de Shorter y Harmathy es el más reconocido y propone que el desprendimiento podría ser causado por "obstrucción por humedad" [25,26]. En condiciones normales ($T = 20$ °C), la humedad se distribuye uniformemente dentro del hormigón, un aumento de la temperatura mayor a 100 °C conduce a movimientos de vaporización y humedad. La humedad migra en parte hacia afuera, hacia la superficie calentada y en parte hacia adentro, en secciones de hormigón más profundas. El gradiente de presión luego impulsa la humedad no sólo fuera de la muestra sino también hacia las regiones internas más frías. Cuando el vapor se encuentra con una capa vecina más fría, se condensará. Este proceso continuará avanzando en la sección transversal, hasta que se cree una región completamente

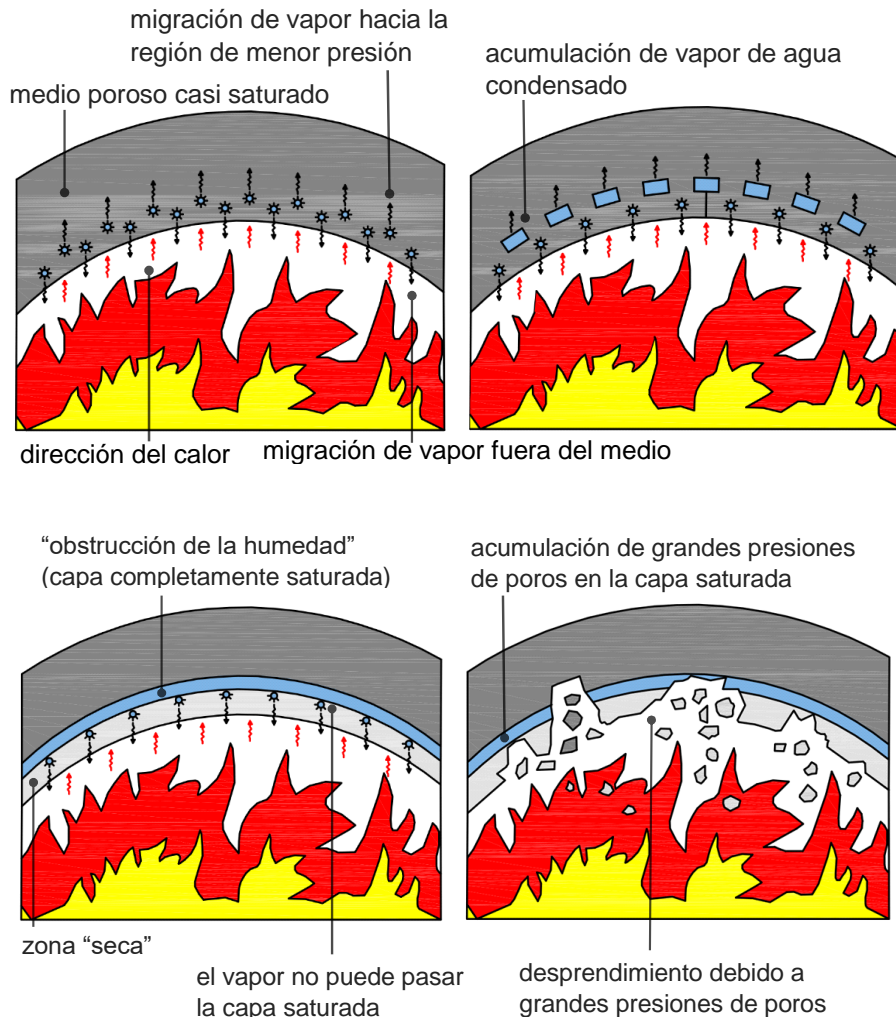


Figura 4. Desprendimiento explosivo inducido por presión de poros.

saturada llamada "obstrucción de humedad" que restringe el movimiento adicional del vapor hacia las regiones más frías, lo que conducirá a un aumento rápido de la presión durante el calentamiento adicional. En el momento que esta presión excede la resistencia a tracción del hormigón, se producirá un desprendimiento explosivo.

2.1.2 Desprendimientos explosivos inducidos por estrés térmico

El calentamiento del hormigón genera gradientes de temperatura que inducen tensiones de compresión cerca de la superficie calentada (debido a la expansión restringida) y tensiones de tracción en las regiones interiores más frías [27-29]. Estos

esfuerzos están relacionados con la expansión térmica del hormigón. El desprendimiento por estrés térmico puede ocurrir en el hormigón seco, esto demuestra que otros factores además de la presión de los poros contribuyen al desprendimiento explosivo. En general, el desprendimiento por estrés térmico está influenciado por la expansión del agregado, el nivel de carga aplicada, la velocidad de calentamiento y la resistencia a la tracción del hormigón. La compresión de la superficie puede aumentar por la carga o el pretensado, que se superponen a los esfuerzos térmicos. Sin embargo, muy pocas estructuras de hormigón se cargan a niveles en los que se alcanza el estado de tensión de rotura necesario. Esto hace que el desprendimiento explosivo por estrés térmico, en sí mismo, sea una

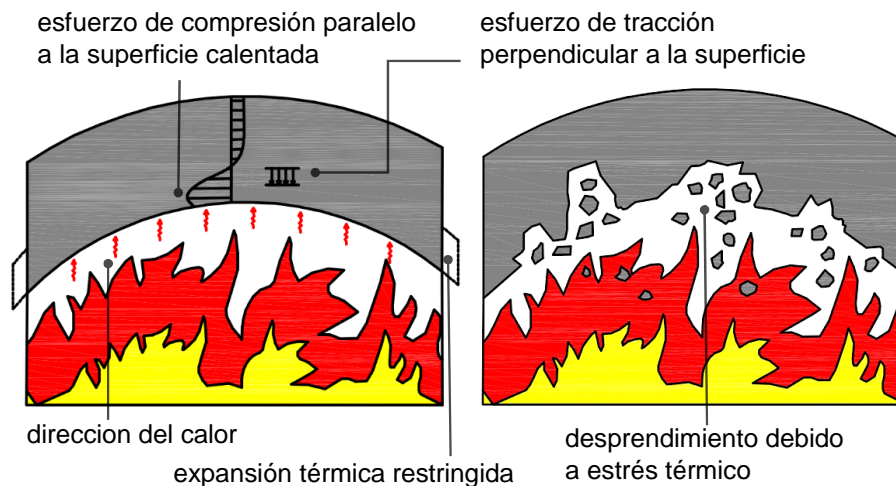


Figura 5. Desprendimiento explosivo inducido por estrés térmico.

ocurrencia relativamente rara, aunque no imposible. Estos desprendimientos se pueden controlar adoptando medidas como la elección de agregados de menor coeficiente de expansión térmica.

3. Empleo de fibras de polipropileno en hormigones expuestos a alta temperatura

La protección pasiva mediante el uso de barreras térmicas y la incorporación de fibras de polipropileno en la mezcla se encuentran dentro de las medidas más efectivas para evitar o mitigar el spalling. Dentro del hormigón, las fibras de polipropileno reducen la presión de vapor de poros y por ende la probabilidad de un desprendimiento explosivo [30-35]. Dado que los requisitos de durabilidad del hormigón en condiciones de servicio (baja permeabilidad) resultan en un mayor riesgo de desprendimiento explosivo durante el incendio, el uso de fibras incrementa la permeabilidad durante el mismo.

El empleo de estas fibras puede ser una buena solución para nuevas estructuras en las que se requiera considerar la seguridad estructural ante un incendio, especialmente para prevenir el desprendimiento explosivo. Una ventaja de las fibras es su bajo costo por

unidad de superficie en comparación con las barreras térmicas. No obstante, es importante saber que a diferencia de estas últimas, las fibras no reducen la temperatura del hormigón en ningún sentido práctico, sino que operan dentro del hormigón para reducir la presión de poro [36]. Asimismo, tampoco influyen para prevenir los desprendimientos por estrés térmico.

En la década de 1990 se reportaron las primeras pruebas con fibras de polipropileno indicando su efectividad para reducir y hasta incluso eliminar los desprendimientos explosivos. El uso de éstas como medida de protección se ha convertido en parte de la norma europea de diseño [37]. Allí, se recomienda el uso de microfibras monofilamento de polipropileno para minimizar el riesgo de desprendimiento explosivo de hormigones de alta performance en una dosis mínima de 2 kg/m^3 . Por microfibras se entiende una fibra fina no estructural con un diámetro generalmente en el rango de $15 \mu\text{m} - 32 \mu\text{m}$, una longitud en el rango de $6 \text{ mm} - 12 \text{ mm}$ y una densidad de $0,9 \text{ g/cm}^3$ [38]. Algunos anexos nacionales del Eurocódigo recomiendan hasta $4,0 \text{ kg/m}^3$ de fibras de polipropileno, dependiendo de la razón a/c del hormigón. No obstante, no se proporcionan indicaciones adicionales respecto de la geometría de la fibra.

En la práctica se recomienda un contenido entre 1 y 3 kg/m³ de microfibras para prevenir desprendimientos explosivos en el hormigón, en función de la severidad del calentamiento, el contenido de humedad y la permeabilidad del hormigón. La efectividad podría verse reducida si se emplea una dosis de microfibra por debajo de 1 kg/m³, pero sin embargo, en algunos casos se ha demostrado que valores más bajos también son efectivos [39]. Si el contenido excede los 3 kg/m³, los problemas de trabajabilidad comienzan a dominar. Estas dosis de microfibras corresponden en volumen a 0,11 % – 0,33 % del volumen de hormigón.

3.1 Mecanismos de acción de las fibras de polipropileno

3.1.1 Formación de canales

Las fibras de polipropileno se funden cuando la temperatura alcanza aproximadamente 160 °C - 170 °C creando canales. Con la adición de fibras se busca lograr un sistema de canales interconectados con la consecuente mejora de la permeabilidad de la matriz. En hormigones con una razón a/c moderada, los poros capilares están discontinuados y las fibras pueden servir para conectar los poros, en los hormigones de baja resistencia los poros capilares continuos proporcionan los microcanales para la liberación de humedad. Algunos investigadores afirman que las fibras primero deben gasificarse para crear dichos canales [40,41]. Para otros autores, debido a la elevada viscosidad del polipropileno derretido, su poca afinidad con el hormigón y la pequeña estructura de poros, no es posible que éste se absorba en la matriz para crear los canales. Teniendo en cuenta que la dimensión molecular del polipropileno derretido, antes de vaporizarse, es del orden de 14 nm, es poco probable que las moléculas puedan penetrar los poros (del orden de 1 µm) y mucho menos los poros de gel (1,5 nm - 2,0 nm). Tomando en cuenta estas bases, el polipropileno sólo podría fluir a

través de los canales interconectados y por poros capilares, microfisuras y poros de gel que se han engrosado lo necesario durante el calentamiento como para que fluyan estas moléculas. Sin embargo, esto tampoco pareciera ser posible dado que las moléculas no se mueven individualmente sino en conjunto, proporcionando fricción interna y una elevada viscosidad, por lo que se requiere un enorme esfuerzo para forzar las moléculas a penetrar la matriz. Al aumentar la temperatura, el peso molecular se reduce progresivamente, y se crean pequeñas moléculas de hidrocarburos que se volatilizan aproximadamente a los 350 °C, a partir de lo cual, el proceso se acelera aún más, y a los 475 °C se habrá producido la vaporización. Entre 350 °C y 475 °C, los canales dejados por las fibras contendrían tanto fibras fundidas como vapor originado de la volatilización de los hidrocarburos. Por encima de 475 °C solo existen productos de vapor volátiles. En la fase gaseosa, las moléculas se mueven independientemente una de otras y es aquí donde se puede considerar la penetración de la molécula aislada en el hormigón.

Los resultados de la prueba de la “gota de agua” de Kalifa [42] parecen demostrar que el polipropileno fundido puede ser absorbido por la matriz circundante. En esta prueba, se colocó una capa de fibras de polipropileno sobre una superficie de hormigón y se cubrió con un cubo de hormigón (Fig. 6). Posteriormente se calentó la muestra hasta 170 °C a una velocidad de 1 °C/min, una vez frío se retiró el cubo superior y se colocó una gota de agua en el lugar donde se habían dispuesto las fibras, se observó que la gota permanecía en su lugar indicando que el polipropileno había impermeabilizado la superficie. El mismo procedimiento se repitió a 200 °C donde se pudo apreciar que al cabo de unos segundos la gota desaparecía confirmando así que la misma era absorbida por el hormigón. A partir de estos resultados se concluyó que el polipropileno, al fundirse, es absorbido por la matriz de cemento que rodea la fibra. Los resultados de la prueba de la “gota de agua” fueron comprobados por las experiencias realizadas por Jansson [43].

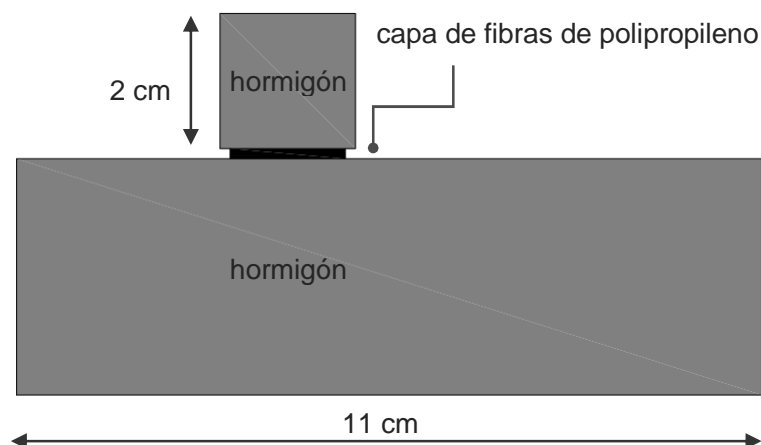


Figura 6. Prueba de la “gota de agua” (adaptado de [42]).

3.1.2 Formación de zonas de transición en la interfaz (ITZ)

La porosidad capilar en la pasta de cemento pasa de estar conectada a no conectada para aproximadamente una porosidad del 20 %. Por lo general, después de 28 días, y si la relación $a/c < 0,5$, la permeabilidad es lo suficientemente baja como para que el vapor de agua producido durante el calentamiento, logre escapar del sistema. En morteros y hormigones entra en juego la percolación de las interfaces (ITZ), debido a que éstas tienen una relación a/c mayor que la pasta de cemento, la porosidad capilar en esta zona es mucho mayor (de 2 a 3 veces). Por lo tanto, si la porosidad capilar de las interfaces individuales se encuentra conectada, podría existir una ruta de escape conveniente para el vapor de agua durante el calentamiento. También las interfaces entre las fibras y la matriz de cemento pueden contribuir a un aumento de la permeabilidad. Esta hipótesis explica que la ITZ de las fibras se une con la de los agregados creando así un sistema de canales más o menos continuo para el movimiento de humedad. Bentz [44] describe la permeabilidad de estas regiones utilizando un modelo de percolación, donde cada partícula de agregado se ve como un núcleo duro e impenetrable, rodeado por una capa blanda concéntrica (ITZ), que puede superponerse a otras capas blandas o porciones de otras partículas de núcleo duro.

En la Fig. 7 se ilustra este modelo en dos dimensiones. En la Fig. 7a, las partículas del agregado están rodeadas por una región ITZ, pero éstas no se encuentran interconectadas a lo largo del elemento, por lo que no se ha logrado percolar el sistema. En la Fig. 7b, se ha aumentado el espesor de la ITZ, de modo que se logra la interconectividad entre la zona superior y la zona inferior. En la Fig. 7c la interconectividad se ha logrado aumentando el número de partículas de agregados en el sistema. Finalmente, en la Fig. 7d, la interconectividad se logra mediante la adición de unas pocas microfibras al sistema. En base a esta simple ilustración, se puede ver claramente la eficiencia potencial de las fibras en la percolación de las regiones ITZ. Inicialmente se recomendaba el uso de fibras de mayor diámetro con zonas de interfaz más grandes para aumentar la efectividad del mecanismo. No obstante, Houry [41] sugiere que un diámetro menor conduce a áreas superficiales más grandes para una dosis dada, lo cual beneficia la interconectividad.

Según Kalifa [42] en hormigones de alta resistencia la ITZ podría ser el mecanismo predominante de alivio de presiones hasta aproximadamente 200 °C cuando la dosis de fibras es baja y no pueden por si solas constituir una red interconectada en estas primeras instancias de calentamiento, donde aún no hay cambios significativos en el tamaño de poros y microfisuras.

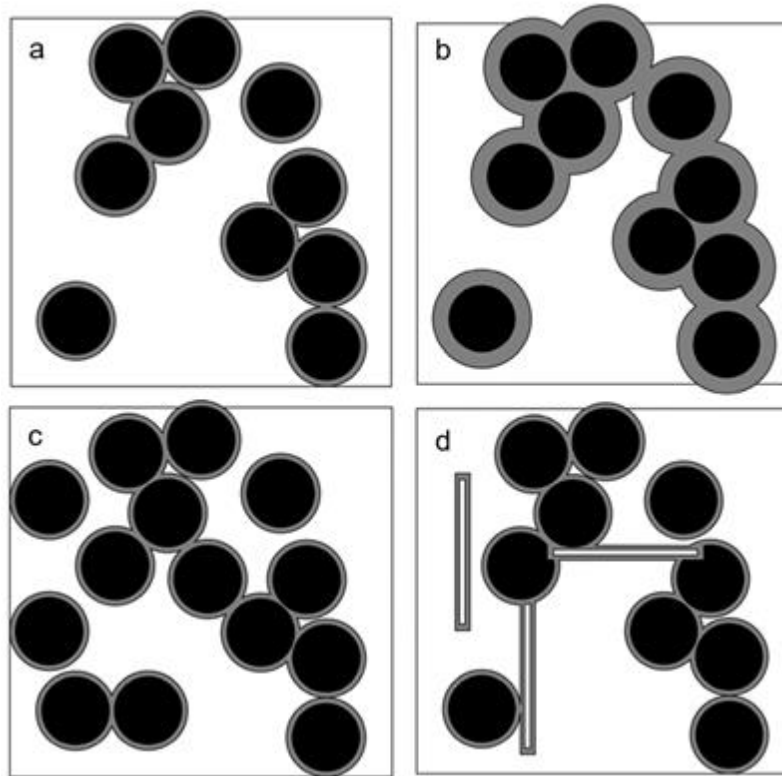


Figura 7. Percolación de ITZ en hormigón 2D, partículas de agregados en negro, fibras en blanco e ITZ en gris (adaptado de [44]).

Temperaturas mayores, hasta 400 °C, producen una red porosa más permeable a la vez que aumenta la densidad de microfisuras que podrían construir una red interconectada, aumentando la eficiencia de las fibras. Este mecanismo podría explicar los resultados positivos en pruebas de desprendimiento con dosis pobres de microfibras del orden de 0,9 kg/m³.

3.1.3 Formación de espacios tangenciales inducidos por presión (PITS)

Algunos autores [41] creen que cada fibra se compacta en la dimensión radial producto de la elevada presión de vapor que se ejerce sobre ellas por encima de los 100 °C, dando lugar a los PITS (siglas en inglés de espacios tangenciales inducidos por presión) (Fig. 8). El vapor puede pasar a través de estos espacios tangenciales que se desarrollan, ya que las fibras pierden adhesión con la matriz. También se argumenta que no se puede

ignorar el papel de la interfaz fibra-hormigón como canal para la liberación de humedad bajo presión, tanto antes como después de que la fibra se haya fundido. Estos espacios tendrían un tamaño del orden de los poros capilares. La efectividad del mecanismo parece estar influenciado por el área superficial y la conectividad de las fibras.

3.1.4 Formación de microporos

Al introducir fibras en la mezcla, se observó que aumenta el contenido de aire entre 1 % y 2 %, lo que puede considerarse como "depósitos discontinuos". Estos vacíos adicionales pueden contribuir a la liberación de presión a través del sistema de poros y canales del hormigón.

3.1.5 Formación de microfisuras

El desarrollo de la microfisuración durante el calentamiento es uno de los mecanismos de

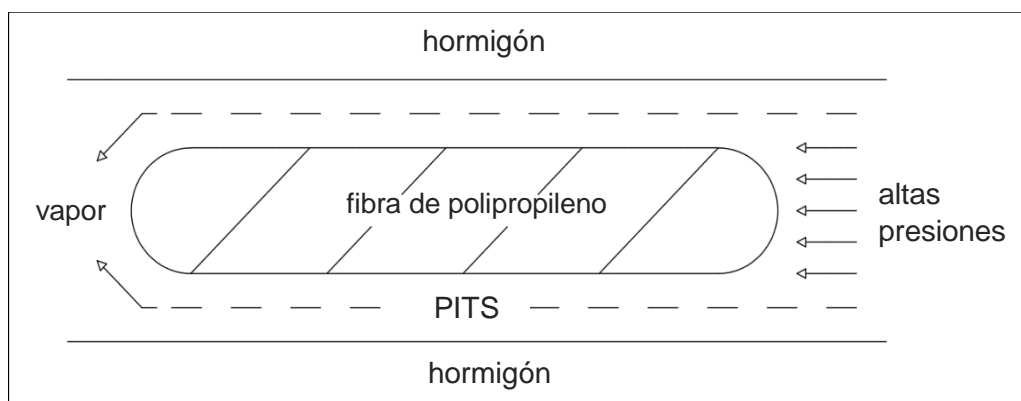


Figura 8. Espacios tangenciales inducido por presión “PITS” [41].

liberación de presión del hormigón Las microfisuras se pueden originar por la expansión térmica diferencial entre la fibra y la matriz circundante, el coeficiente de expansión térmica del polipropileno es aproximadamente diez veces mayor que el del hormigón. Para un incremento inicial de 30 °C en la temperatura del hormigón (de 20 °C a 50 °C) y asumiendo que los coeficientes de expansión térmica se mantienen constantes dentro de ese rango, generaría una deformación térmica diferencial de 2610 μm , si esta expansión es restringida se genera una tensión axial de 10 MPa en la matriz circundante [40]. No obstante, estas tensiones serían mucho más bajas debido al módulo de elasticidad más bajo de la fibra respecto al hormigón y a la degradación del mismo con el aumento de la temperatura.

Los canales que dejan las fibras al fundirse, promueven la fisuración de la matriz (Fig. 9). Independientemente de qué mecanismo de microfisuración predomine, queda claro que las microfisuras actúan como reservorios, y si estas además resultan continuas, entonces actúan como canales.

3.2 Características de las fibras de polipropileno

En la norma europea EN 1992 Eurocódigo 2 [37], se hace referencia al uso de 2 kg/m^3 de microfibras de polipropileno monofilamento para controlar el desprendimiento explosivo en hormigones de alta resistencia. Las

microfibras monofilamento de polipropileno (fibras de polipropileno 100 % virgen que no contienen materiales de olefina reprocessados) corresponden a la Clase 1a de acuerdo con la norma BS EN 14889-2 [38]. No obstante, los reglamentos no hacen referencia respecto a las dimensiones de las microfibras. Sin embargo, los mecanismos de liberación de presión explicados anteriormente están relacionados directamente con las características del polímero, el número y dimensiones de las fibras. El número de fibras es uno de los parámetros más importantes, para una misma dosis la disminución en el número de fibras no es lineal con el aumento del diámetro de la fibra. Si por ejemplo se incorporan 1 kg/m^3 de fibras de 10 μm de diámetro y una longitud de 6 mm al aumentar el diámetro 10 veces, manteniendo la longitud, el número de fibras disminuye 100 veces. La cantidad de fibras se reduce linealmente cuando aumenta su longitud pero cuando aumenta su diámetro la disminución es mucho más importante. El área superficial de la fibra para una misma dosis por m^3 de hormigón se reduce con el aumento del diámetro de la fibra, ésta es relevante para el mecanismo PITS. Por lo tanto, a igual contenido de fibra, podría ser más efectivo un mayor número de fibras de menor diámetro. Si los mecanismos de liberación de presión son más eficientes con fibras más largas, entonces, para el mismo contenido de fibra, el beneficio mejoraría con la disminución del diámetro de la fibra. Para una fibra demasiado corta la interconectividad se reducirá

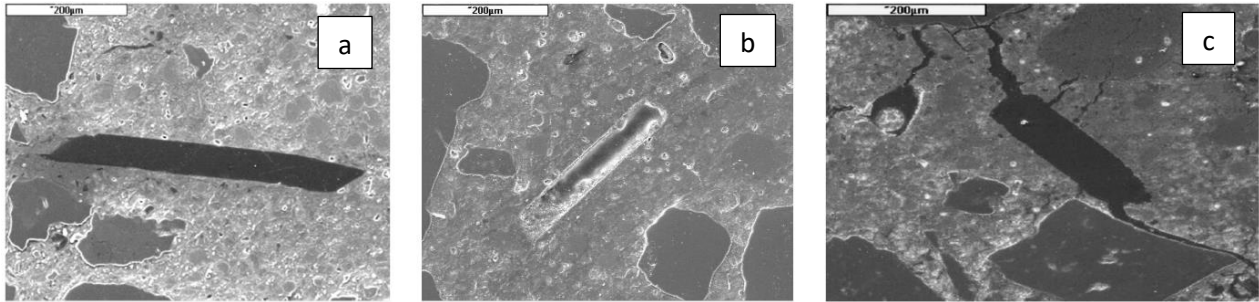


Figura 9. Fibras de polipropileno en el hormigón antes de calentar (a) luego de un calentamiento a 150 °C (b) y luego de un calentamiento a 600 °C (c). Imágenes de SEM a 50x [45].

significativamente, en el extremo opuesto, si es demasiado larga, entonces podría haber un problema con la dispersión y la mezcla. Experiencias realizadas demuestran que para una misma microfibras de polipropileno y para la misma dosis, pero diferentes longitudes, las microfibras más cortas resultaron menos eficientes que las más largas. Estas observaciones indicarían que la interconectividad alcanzada en el interior del hormigón es dependiente de la longitud de las mismas, donde los canales creados por la inclusión de microfibras más largas resultan en una red bien conectada de canales, poros preexistentes, microfisuras e interfaces [46,47].

Por lo expuesto, es claro que a medida que se reduce el diámetro de la fibra los mecanismos se vuelven más eficientes. En la bibliografía [48-50] hay acuerdo que la efectividad de la fibra depende de la interconectividad de los poros y de la permeabilidad que la inclusión de éstas pueda crear. Por otra parte, la habilidad para la reducción de presión de vapor es independiente del diámetro de la fibra debido a que las partículas de vapor son muchas veces más pequeñas que el diámetro de la fibra, es decir, independientemente del diámetro de ésta, la efectividad del transporte de vapor sería la misma siempre que la longitud de la fibra sea la misma. No obstante, pueden encontrarse estudios que demuestran resultados contradictorios respecto de la influencia de las dimensiones de las microfibras. Esto se debe en parte, a la escasez de estudios extensos que aborden la influencia de las características de éstas.

Tampoco el comportamiento de la combinación de microfibras de polipropileno con otras fabricadas con distintos materiales poliméricos o la combinación con macrofibras estructurales como acero o polipropileno se ha desarrollado en profundidad y hasta el momento la información disponible en la bibliografía al respecto es limitada.

4. Consideraciones finales

En este artículo se presenta una revisión del fenómeno de desprendimiento explosivo o spalling que puede experimentar el hormigón en un escenario de incendio y del uso de microfibras de polipropileno como una solución económica y efectiva a dicho fenómeno. Algunas consideraciones que pueden extraerse de lo expresado son las siguientes:

- El spalling es un fenómeno físico que puede experimentar el hormigón durante el calentamiento. Existen diferentes tipos de spalling y cada uno de ellos depende de diversas variables. En la bibliografía se reconoce el spalling explosivo como el más severo, dado que puede comprometer la seguridad estructural de los elementos. Durante el calentamiento coexisten dos mecanismos de naturaleza diferente: uno termo-hidráulico (debido a elevadas presiones de vapor de agua) y otro termo-mecánico (debido a un estrés térmico en la superficie calentada).

- En la década de 1990, como consecuencia del interés que había por el estudio de los

hormigones de alta resistencia, el desarrollo de las primeras microfibras y principalmente como resultado de una sucesión de accidentes de incendios catastróficos, se dio lugar al estudio de los primeros hormigones reforzados con microfibras poliméricas para evitar el desprendimiento explosivo del hormigón.

En la bibliografía se reconoce que la incorporación de microfibras de polipropileno es una de las soluciones de protección pasiva más efectivas y económicas disponibles para evitar los desprendimientos explosivos. Durante el calentamiento, las microfibras de polipropileno se funden a aproximadamente 170 °C, lo que resulta en un aumento de la permeabilidad del hormigón y como consecuencia, un alivio de la presión de vapor que producen los desprendimientos. Su efectividad estará íntimamente relacionada con las características de las fibras y de la dosis en que estas se incorporen al hormigón.

- No se dispone en la actualidad de mayores precisiones por parte de los reglamentos de cómo deben emplearse las microfibras. En la sección 6.1 de la norma europea EN 1992 - Eurocódigo 2, se hace referencia al uso de 2 kg/m³ de microfibras de polipropileno monofilamento para controlar el desprendimiento explosivo en hormigones de alta resistencia. No obstante, no se hace referencia a las dimensiones de las mismas ni se dan mayores referencias al respecto.

- Las principales aplicaciones de las microfibras de polipropileno se materializan en túneles revestidos de hormigón y estructuras especiales, en donde el comportamiento al fuego es un requisito de diseño.

Referencias

- [1] Kodur, V. K. R., y Naser, M. Z. (2020). *Structural Fire Engineering*, McGraw-Hill Publication.
- [2] Bazant, Z. P., y Kaplan, M. F. (1996). *Concrete at high temperatures: Material properties and mathematical models*.

Longman Concrete Design and Construction Series.

- [3] Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- [4] Mehta, P. K., y Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, properties and materials*. McGraw-Hill.
- [5] Aïtcin, P.-C. (1998). *High-Performance concrete*. CRC Press.
- [6] International Organization for Standardization. (1999). *ISO 834-1. Fire resistance test - Elements of building construction - Part 1: General requirements for fire resistance testing*.
- [7] European Commission. (2002). *EN1991-1-2. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*.
- [8] Ingason, H. (Ed.) (2003). *Proceedings of the international symposium on catastrophic tunnel fires*. SP Swedish National Testing and Research Institute.
- [9] Beard, A., y Carvel, R. (2005). *Handbook of tunnel fire safety* (1st ed.). ICE Publishing.
- [10] Hedayati, M., Sofi, M., Mendis, P. A., y Ngo, T. (2015). A comprehensive review of spalling and fire performance of concrete. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 15, 8–34.
- [11] Kirkland, C. J. (2002). The fire in The Channel Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 17, 129–132. <https://doi.org/fp9sh3>
- [12] Kodur, V. K. R. (2000). Spalling in high strength concrete exposed to fire – concerns, causes, critical parameters and cures. *Advanced Technology in Structural Engineering*, Structures Congress 2000, 1–9. <https://doi.org/cc592d>
- [13] Shuttleworth, P. (2002). Fire protection of concrete tunnel linings. *Tunnel Management International*, 3(2), 1–9.
- [14] Fabbri, D. (2004). The Gotthard Base Tunnel: fire/life safety system. En D. Fabbri (Chief designer), *Proceedings of the 6th Annual Tunnelling 2004 Conference* (pp. 1–9). Lombardi Engineering Limited.

- [15] International Federation for Structural Concrete. (2007). *Fire design of concrete structures—materials, structures and modelling* (State-of-the-art report, fib Bulletin No. 38).
- [16] Pimienta, P., Pardon, D., y Mindeguia, J. C. (2010). Fire behaviour of high performance concrete – an experimental investigation on spalling risk. En V. Kodur, y J.-M. Franssen (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference on Structures in Fire (SiF2010)* (pp. 880–889). DEStech Publications, Inc.
- [17] Pimienta, P., Alonso, M. C., McNamee, R., y Mindeguia, J. C. (2017). Behaviour of high-performance concrete at high temperatures: some highlights. *RILEM Technical Letters*, 2, 45–52. <https://doi.org/h63s>
- [18] Kodur, V. (2018). Innovative strategies for enhancing fire performance of high-strength concrete structures. *Advances in Structural Engineering*, 21(11), 1723–1732. <https://doi.org/gd34vj>
- [19] Jansson, R. (2013). Fire spalling of concrete - A historical overview. *MATEC Web of Conferences*, 6, 01001. <https://doi.org/gf8ddk>
- [20] McNamee, R. (2019). Fire spalling theories – realistic and more exotic ones. En S.-S. Huang, y I. Burgess (Eds.), *Proceedings of the 6th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure* (pp. 13–21). The University of Sheffield.
- [21] Khoylou, N. (1997). *Modelling of moisture migration and spalling behaviour in non-uniformly* [Doctoral dissertation, University of London].
- [22] Breunese, A. J., y Fellingner, J. H. H. (2004). Spalling of Concrete - An Overview of Ongoing Research in the Netherlands. En J. M. Franssen, N. Benichou, V. R. Kodur, y M. A. Sultan (Eds.), *STRUCTURES IN FIRE - Proceedings of the 3rd International Workshop (SiF'04)* (pp. 249–258). CNRC.
- [23] Ichikawa, Y. (2000). *Predictions of pressures, heat and moisture transfer leading to spalling of concrete during fire* [Doctoral dissertation, University of London].
- [24] Meyer-Ottens, C. (1972). *Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung* [Doctoral dissertation, Technischen Universität Carolo - Wilhelmina zu Braunschweig].
- [25] Shorter, G. W., y Harmathy, T. Z. (1961). Discussion on the article "The fire resistance of prestressed concrete beams" by L. A. Ashton and S. C. C. Bate. *Proceedings, Institute of Civil Engineers*, 20, 305–320.
- [26] Harmathy, T. Z. (1965). Effect of moisture on the fire endurance of building materials. En A. Robertson (Ed.), *Moisture in materials in relation to fire tests*, ASTM Special Technical Publication No. 385. ASTM. <https://doi.org/dvn68f>
- [27] Klingsch, E. W. (2014). *Explosive spalling of concrete in fire* [Doctoral dissertation, ETH Eidgenössische Technische Hochschule]. Research Collection ETH zürich. <https://doi.org/h67h>
- [28] Kalifa, P., Menneteau, F.-D., y Quenard, D. (2000). Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 30, 1915–1927. <https://doi.org/bfs3zx>
- [29] Khoury, G. A. (2008). Concrete spalling assessment methodologies and polypropylene fibre toxicity analysis in tunnel fires. *Structural Concrete*, 9(1), 11–18. <https://doi.org/csqzpr>
- [30] Bilodeau, A., Kodur, V. K. R., y Hof, G. C. (2004). Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. *Cement and Concrete Composites*, 26(2), 163–174. <https://doi.org/fqdpqg>
- [31] Hertz, K. D. (2003). Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*, 38(2), 103–116. <https://doi.org/cxk3pm>
- [32] Liu, X., Ye, G., De Schutter, G., Yuan, Y., y Taerwe, L. (2008). On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 487–499. <https://doi.org/dpmmrt>
- [33] Pimienta, P., McNamee, J. R., y Mindeguia, J.-C. (Eds.). (2018). *Physical properties and behaviour of high-performance concrete at high temperature. State-of-the-Art Report of*

the RILEM Technical Committee 227-HPB. Springer. <https://doi.org/h67j>

- [34] Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4), 429–447. <https://doi.org/bfzkz8>
- [35] Bangi, M. R., y Horiguchi, T. (2012). Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 42(2), 459–466. <https://doi.org/fhc92q>
- [36] Khoury, G. A. (2008). Passive fire protection of concrete structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 161(3), 135–145. <https://doi.org/b6cd2h>
- [37] European Comission. (2004). *EN1992-1-2. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*.
- [38] British Standards. (2006). *BS EN 14889-2. Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definitions, specifications and conformity*.
- [39] McNamee, R., Sjöström, J., y Boström, L. (2021). Reduction of fire spalling of concrete with small doses of polypropylene fibres. *Fire and Materials*, 45(7), 943–951. <https://doi.org/gmd6z9>
- [40] Khoury, G. A., y Willoughby, B. (2008). Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behaviour. *Magazine of Concrete Research*, 60(2), 125–136. <https://doi.org/fkkg3q>
- [41] Khoury, G. A. (2008). Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria. *Magazine of Concrete Research*, 60(3), 189–204. <https://doi.org/c6vb78>
- [42] Kalifa, P., Chéne, G., y Gallé, C. (2001). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1487–1499. <https://doi.org/dg7bmr>
- [43] Jansson, R. (2013). *Fire spalling of concrete theoretical and experimental studies* [Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology].
- [44] Bentz, D. P. (2000). Fibers, percolation, and spalling of high performance concrete. *ACI Materials Journal*, 97(3), 351–359.
- [45] Hager, I., y Mróz, K. (2019). Role of polypropylene fibres in concrete spalling risk mitigation in fire and test methods of fibres effectiveness evaluation. *Materials*, 12(23), 3869. <https://doi.org/h67m>
- [46] Heo, Y.-S., Sanjayan, J. G., Han, C.-G., y Han, M.-C. (2011). Critical parameters of nylon and other fibres for spalling protection of high strength concrete in fire. *Materials and Structures*, 44, 599–610. <https://doi.org/c9mng6>
- [47] Zhang, D., y Tan, K. H. (2020). Critical fibre dimensions for preventing spalling of ultra-high performance concrete at high temperature. En D. Lange et al. (Eds.), *Proceeding of the 11th International Conference on Structures in Fire (SiF 2020)*. (pp. 333–341). The University of Queensland
- [48] Heo, Y. S., Sanjayan, J. G., Han, C. G., y Han, M. C. (2011). Dimensional characteristics of various types of fibres in fire resistance concrete. En S. Fragomeni, y S. Venkatesan (Eds.), *Incorporating sustainable practice in mechanics and structures of materials* (pp. 519–524). CRC Press/Balkema.
- [49] Heo, Y. S., Sanjayan, J. G., Han, C. G., y Han, M. C. (2012). Limited effect of diameter of fibres on spalling protection of concrete in fire. *Materials and Structures*, 45, 325–335. <https://doi.org/brnv7h>
- [50] Heo, Y. S., y Kim, K. (2015). Design of fire resistant concrete using combined fibers. *Journal of Ceramic Processing Research*, 16(S1), 28–32.