

Hormigón reforzado con fibras poliméricas expuesto al fuego

D. M. Dias^{1*} , J. L. Calmon¹ , G. L. Vieira¹ 

*Autor de Contacto: dainerdias@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i1.426>

Recepción: 01/07/2019 | Aceptación: 27/11/2019 | Publicación: 30/12/2019

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue investigar la influencia de la adición de fibras poliméricas de polipropileno, poliéster, poliamida, aramida y pulpa de aramida en el comportamiento de hormigones sometidos a temperaturas elevadas. Las probetas con adiciones de fibras a una tasa de 2 kg/m³ fueron producidas y sometidas a altas temperaturas a través de pruebas en horno y de fuego directo. También se construyeron columnas y se sometieron a un simulador de incendios en vivo perteneciente al Departamento de Bomberos de Espírito Santo - Brasil. Se analizaron las propiedades microestructurales y mecánicas. Se observó que las fibras pueden influir en las propiedades del concreto y que los ensayos de fuego con carga de incendio estándar pueden ser una alternativa o complemento para el análisis de hormigón sometido a temperaturas elevadas.

Palabras clave: hormigón reforzado; fibras poliméricas; altas temperaturas; fuego; propiedades mecánicas.

Citar como: Dias, D. M., Calmon, J. L. Vieira, G. L. (2020), “Hormigón reforzado con fibras poliméricas expuesto al fuego”, Revista ALCONPAT, 10 (1), pp. 36 – 52, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v10i1.426>

¹ Universidad Federal de Espírito Santo, Vitória-ES, Brasil.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2020.

Polymeric fiber reinforced concrete exposed to fire

ABSTRACT

The aim of this work was to investigate the influence of the addition of polypropylene, polyester, polyamide, aramid and aramid pulp fibers on the behavior of concretes subjected to high temperatures. For that, test specimens with fiber additions were made at a rate of 2 kg/m^3 and submitted to temperatures in furnace, as well as to high temperatures through direct fire test. Columns were also built and subjected to a live fire simulator belonging to the Espírito Santo Fire Department - Brazil. Microstructural and mechanical properties were analyzed. It has been observed that the fibers may influence the properties of the concrete and that fire tests with standard fire load may be an alternative or complementary analysis of concrete subjected to elevated temperatures.

Keywords: Reinforced concrete; polymeric fibers; high temperatures; fire; mechanical properties

Concreto reforçado com fibras poliméricas exposto ao fogo

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi investigar a influência da adição de fibras poliméricas de polipropileno, poliéster, poliamida, aramida e polpa de aramida no comportamento de concretos submetidos a temperaturas elevadas. Para tanto, corpos de prova com adições de fibras a uma taxa de 2 kg/m^3 foram produzidos e submetidos a mufla, bem como a altas temperaturas através de teste de fogo direto em grelha. Protótipos também foram construídos e submetidos a simulador de incêndio real pertencente ao Corpo de Bombeiros do Espírito Santo - Brasil. Propriedades microestruturais e mecânicas foram analisadas. Observou-se que as fibras podem influenciar as propriedades do concreto e que os ensaios de teste de fogo com carga de incêndio padrão podem ser uma alternativa ou complementar análise de concreto submetido a temperaturas elevadas.

Palavras-chave: Concreto reforçado; fibras poliméricas; altas temperaturas; incêndio; propriedades mecânicas.

1. INTRODUCCIÓN

Grandes incendios han comprometido severamente varias estructuras a lo largo de la historia (Metha y Monteiro, 2008). La seguridad estructural contra incendios es una de las consideraciones más importantes que deben aplicarse a los edificios (Khalaf y Huang, 2016). El comportamiento del hormigón bajo la acción de agentes agresivos ha sido objeto de estudios en las áreas de tecnología y durabilidad del hormigón (Petrucci, 1981).

Ma et al. (2015), Haddad et al. (2008), Cree et al. (2013) y Park y Yim (2016) mostraron que las altas temperaturas dañan seriamente la microestructura y la mesoestructura del hormigón, lo que causa el perjuicio de las propiedades mecánicas e incluso efectos perjudiciales en el nivel estructural debido a la fisuración del hormigón y la exposición del acero a las llamas en caso de incendio.

El comportamiento de un incendio real es muy diferente al de la mayoría de las pruebas en muflas. En un enfoque basado en el rendimiento, se puede utilizar una representación más realista del fuego, que comprende una fase de calentamiento seguida de una fase de enfriamiento hasta que vuelva a la temperatura ambiente (Gernay y Franssen, 2015). Ensayos a la llama reales son importantes para comprender el verdadero comportamiento del hormigón en incendios, ya que las pruebas de laboratorio convencionales no siempre reflejan el comportamiento de esta situación patológica. Del mismo modo que la resistencia al fuego de las estructuras construidas es mayor de

lo esperado en los ensayos de elementos individuales (Lennon et al., 2007). Se observa que los métodos tradicionales de ensayos de materiales son más conservadores que los con fuego real.

El uso de fibras en el hormigón se ha vuelto popular, principalmente por su resistencia a la fisuración, retracción plástica y mayor tenacidad y, más específicamente, las fibras poliméricas dan al hormigón un mejor comportamiento posterior a la fisuración, evitan y controlan la formación y propagación de fisuras y también inhiben el fenómeno del desprendimiento (*spalling*) (Alhozaimy et al., 1996; Kurtz y Balaguru, 2000; Ezziane et al., 2015; Poon et al., 2004). Corroborando la idea, Pai y Chandra (2013) señalaron que una mejor comprensión de los conceptos detrás del refuerzo de fibra, los nuevos métodos de fabricación y los nuevos tipos de fibras orgánicas llevaron a los investigadores a concluir que las fibras sintéticas y naturales pueden, de hecho, reforzar el hormigón.

En un incendio, las fibras se derriten a cierta temperatura, lo que ayuda a liberar vapor de agua a través de los poros (Pliya et al., 2011). La porosidad adicional y los pequeños canales creados al fundir fibras de polipropileno pueden disminuir la presión de vapor interna en el hormigón y reducir la probabilidad de desprendimiento (*spalling*) (Noumowe, 2005), especialmente en hormigón de alta resistencia.

Lee et al. (2012) señalan que desde los primeros artículos que discutieron la resistencia al fuego del hormigón, como el informe ACI de 1919 (ACI, 2019), varios investigadores han sugerido la adición de fibras al hormigón. Sin embargo, la discusión sobre la influencia positiva de las fibras poliméricas en las propiedades mecánicas del hormigón aún no está finalizada, porque, aunque algunos estudios indican que las fibras no influyen o empeoran significativamente las propiedades de un concreto de referencia, otros estudios han demostrado lo contrario, antes y después. Después de ser sometidas a altas temperaturas, las fibras pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto, como lo demuestran Shihada (2011) y Drzymala et al. (2017)

Los estudios han demostrado que las fibras de polipropileno son efectivas para mitigar el agrietamiento de los hormigones expuestos a altas temperaturas (Ezziane et al., 2015; Xiao y Falkner, 2006; Behnood y Ghandehari, 2009; Bangi y Horiguchi, 2012; Akca y Zihnioğlu, 2013) y que la adición de fibras de polipropileno es el método más utilizado para evitar el desprendimiento (*spalling*) en hormigón de alta resistencia. Song et al. (2005) evaluaron los efectos de la adición de fibras de nylon y polipropileno y mostraron que la resistencia a la compresión del hormigón aumentó, respectivamente, 12,4% y 5,8% en comparación con el hormigón sin fibras. Con respecto a las fibras de poliéster, dependiendo del porcentaje utilizado, la adición de fibras puede contribuir a aumentar la resistencia a la compresión del hormigón, como Suresh et al. (2014) concluirán. A una dosificación óptima, las fibras de poliéster mejoraron la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción por flexión del hormigón expuesto a altas temperaturas en el rango de 150-250 ° C durante intervalos de 1,2 o 3 horas (Sekhar y Raju, 2017). La adición de fibras de poliéster al hormigón puede contribuir a un retraso en el dano del hormigón normal cuando se somete a un rango de temperatura sostenido de 25 a 400 ° C (Suresh et al., 2014). La fibra de aramida todavía es poco común para la industria de la construcción (Çavdar, 2013), lo que demuestra que puede estudiarse mejor.

Por lo tanto, debido a las brechas (gaps) existentes y la importancia del tema, el objetivo de este trabajo fue investigar la influencia de la adición de polipropileno, poliéster, poliamida, aramida y pulpa de aramida en el comportamiento de los hormigones sometidos temperatura elevadas, utilizando diferentes ensayos. Para esto, se hicieron muestras con adición de fibra a una tasa de 2kg/m³. Las muestras o probetas se sometieron a temperaturas de 300°C, 500°C y 700°C en el horno, así como a altas temperaturas mediante ensayos de fuego directo en parrilla. También se construyeron prototipos (columnas) y se sometieron a un simulador de fuego real perteneciente al Departamento de Bomberos de Espírito Santo - Brasil. Posteriormente se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por la flexión, resistencia a la tracción por compresión diametral (ensayo brasileño), pérdida de masa y velocidad del pulso ultrasónico.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y proporciones de la mezcla

Para la preparación del hormigón, se utilizó el cemento Portland CP III 40 RS, según la clasificación estándar (ABNT, 2018). Se utilizó arena natural con módulo de finura de 1,92 y una dimensión máxima de 2,4 mm como árido fino. Se usaron dos tipos de árido de granito en el hormigón como árido grueso, uno con un tamaño característico máximo de 19 mm y el otro con 9 mm. Se usó un superplastificante en la preparación de los hormigones. Las fibras se usaron a una tasa de 2 kg/m³. Esta tasa tenía como objetivo principal reducir la posibilidad de desprendimiento (*spalling*) y siguió una tendencia extraída del estado del conocimiento de la mejor cantidad de fibra (Poon et al., 2004; Behnood y Ghandehari, 2009; Kim et al., 2013; Lourenço et al., 2011; Bei y Zhixiang, 2016), donde se obtuvieron los mejores con una tasa igual a la utilizada o próximo de la misma. Las propiedades típicas de la fibra se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de las fibras

Fibra	Diámetro (µm)	Long. (mm)	Mod. De elasticidad (GPa)	Resist. tracción (GPa)	Densidad (g/cm ³)	Punto de fusión (°C)
Polipropileno	12	12	9,0	0,5	0,91	160
Poliéster	20-25	15	8,2	0,3 – 0,5	1,34	235
Poliamida (Nylon 6.6)	30	12	5,0	0.9	1,14	260
Aramida (Kevlar 29/49)	14	12	65/125	2.8	1,44	427-482
Pulpa de aramida Kevlar	2-13	0,5-1,0	65/125	2.8	1,45	423

2.2 Preparación de las probetas

La proporción de los materiales utilizados para fabricar los hormigones se muestra en la Tabla 2. Se produjeron seis mezclas: la referencia sin fibras (NF), el hormigón reforzado con fibras de polipropileno (PP), el hormigón reforzado con fibras de poliéster (POL), el hormigón reforzado con fibras de poliamida (NY), hormigón reforzado con fibra de aramida (AR) y hormigón reforzado con fibra de pulpa de aramida (AP).

Tabla 2. Mezclas de hormigón

Material	NF	PP	POL	NY	AR	AP
Cemento (kg/m ³)	340	340	340	340	340	340
Árido fino (kg/m ³)	770	770	770	770	770	770
Árido grueso 9 mm (kg/m ³)	300	300	300	300	300	300
Árido grueso 19 mm (kg/m ³)	842	842	842	842	842	842
Agua (l/ m ³)	170	170	170	170	170	170
Superplastificante (l/ m ³)	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85	2,85
a/c	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Fibra (kg/m ³)	0	2	2	2	2	2
Ensayo de asentamiento – cono de Abrams (mm)	190	30	50	70	60	20
Densidad (kg/m ³)	2471	2439	2455	2457	2460	2452

Las probetas cilíndricas y prismáticas se moldearon de acuerdo con NBR 5738 (ABNT, 2015a). Las mezclas de hormigón fresco se ensayarán para determinar la trabajabilidad mediante el ensayo

del cono de Abrams de acuerdo con NBR NM 67 (ABNT, 1998). Poco después se moldearon probetas de hormigón (columnas) con una sección transversal de 20x20 cm y una altura de 1,35 m. Las muestras permanecieron en cura húmeda durante 28 días. Después de este período, las muestras se mantuvieron en un ambiente controlado (cámara climática) durante otros 7 días, con una temperatura constante de 23°C y una humedad relativa del 77%, cerca de la realidad encontrada en el estado de Espírito Santo - Brasil. Como los ensayos a alta temperatura están influenciadas por la humedad y, considerando que el objetivo era ensayar el hormigón lo más cerca posible de la realidad, se realizó el control de temperatura y humedad. ASTM E119 (ASTM, 2018) indica el acondicionamiento de las probetas con el fin de proporcionar una condición de humedad interior similar a los edificios construidos.

2.3 Métodos de ensayos en altas temperaturas

Antes de los ensayos mecánicos, las muestras se sometieron a ensayos en mufla a alta temperatura y llama directa. En el horno de mufla, las temperaturas máximas alcanzadas para el análisis fueron 300, 500 y 700°C. Estos rangos de temperatura analizados (rangos en los que ocurren transformaciones importantes en el hormigón) siguen una tendencia encontrada en el estado del conocimiento, como, por ejemplo, en Xiao y Falkner (2006), Shihada (2011), Suresh et al. (2014) y Yermak et al. (2017) En un estudio anterior, Dias et al. (2017) observaron que a temperaturas más altas los hormigones perdieron su capacidad estructural.

En relación con el desprendimiento (*spalling*), un fenómeno que ocurre con el hormigón sometido a altas temperaturas, factores como el tipo de árido, el tamaño de las probetas, la presencia de aditivos, la resistencia del hormigón y, principalmente, la velocidad de calentamiento, influyen en la presencia de desprendimiento (*spalling*). En la mayoría de los casos, se requiere una temperatura superior a 700°C para el *spalling*. Sin embargo, las temperaturas superiores a 500°C, en conjunta con otras características, ya son suficientes. Por ejemplo, Akca y Zihnioglu (2013) dijeron que se observó un *spalling* explosivo en su investigación, especialmente en probetas sin fibras que empezaron después de 500°C.

Como los incendios reales en compartimentos tienen un pico y poco después el decaimiento (Hartin, 2018), en los ensayos realizados, después de alcanzar la temperatura máxima establecida, el horno se apagó. La velocidad de calentamiento utilizada fue de 10°C/min y el enfriamiento fue a temperatura ambiente durante 24 horas. Los ensayos en mufla siguieron metodologías comúnmente encontradas en el estado del conocimiento para este tipo de ensayos de laboratorio (Ezziane et al., 2015; Poon et al., 2004; Pliya et al., 2011; Shihada, 2011; Pai y Chandra, 2013; Xiao y Falkner, 2006; Behnood y Ghandehari, 2009; Akca y Zihnioglu, 2013; Suresh et al., 2014; Sekhar y Raju, 2017; Bei y Zhixiang, 2016; Choumanidis et al., 2019; Sekhar y Raju, 2017; Srikar et al., 2016; Yermak et al., 2017).

Para obtener resultados que pudiesen compararse con el calentamiento en mufla, también se realizaron ensayos de llama directa de acuerdo con ISO 834-R (ISO, 2015). Para realizar el ensayo, las muestras se colocaron verticalmente en una parrilla de acero con dimensiones de (500x500) mm, a una altura de 100 mm del material combustible, dejando espacio entre ellas para tener contacto directo con el fuego. En ensayos con fuego real, como se encuentra en (Shihada, 2011), el material de combustible utilizado fue la madera. La cantidad de madera utilizada en cada prueba se calculó con base en una carga de fuego estándar de bajo riesgo de 300 MJ / m² que se encuentra comúnmente en pisos en Brasil (Espírito Santo, 2009; São Paulo, 2011; ABNT, 2000), considerándose el potencial calórico de 19 MJ / kg de madera en cada combustión. Para comenzar la quema se usó alcohol. Se insertaron dos sensores de termopar tipo K en el dispositivo para medir la evolución de la temperatura. El Departamento de Bomberos de Espírito Santo - Brasil (CBMES) apoyó con conocimiento y equipo de protección el ensayo con llama real. Este ensayo duró 80 minutos, lo que casi coincidió con el final del material combustible, y el enfriamiento fue al ambiente. El ensayo en mufla y el ensayo de llama directa pueden verse en la Fig. 1

Se usó un termógrafo con sensor infrarrojo antes, durante y después de las pruebas de alta temperatura. Se realizaron pruebas mecánicas de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción en la flexión y resistencia a la tracción por compresión diametral (ensayo brasileño) después de las pruebas de alta temperatura. Las mediciones de la velocidad del pulso ultrasónico y la pérdida de masa se realizaron antes y después de la sumisión a alta temperatura.

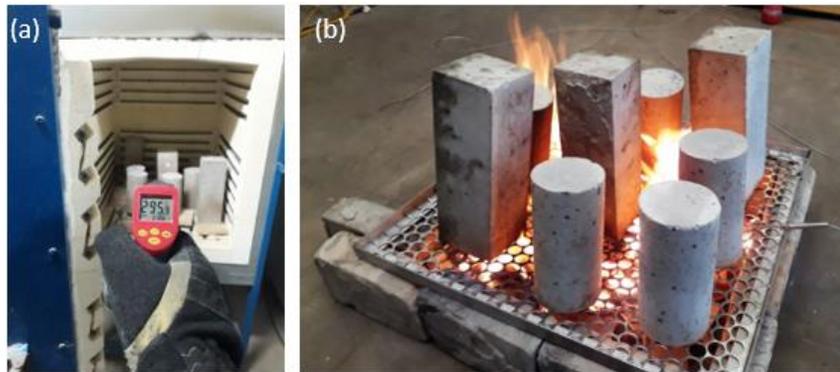


Fig. 1. Aumento de temperatura a través de la mufla (a) y la llama directa de la parrilla (b)

Con el fin de complementar el análisis, especialmente en caso de *spalling*, se realizaron ensayos de fuego reales en los prototipos - columnas, utilizando uno de los simuladores de fuego CBMES. El módulo elegido proporciona un comportamiento de fuego extremo en los primeros minutos de fuego. La ventilación fue controlada por las puertas delanteras. La carga de fuego estipulada también era de bajo riesgo al usar madera contrachapada y pallets. La disposición de la carga de fuego y las columnas en el simulador se puede ver en la Fig. 2. El ensamblaje siguió los patrones de quema de la brigada de bomberos y tuvo como objetivo proporcionar realidad en la evolución del fuego y la uniformidad de la quema. Los sensores de termopar de tipo k se insertaron 0,8 m y 1,6 m de altura en el contenedor para medir la temperatura interna y un sensor estaba controlando la temperatura externa. Un bombero con todo el equipo de protección personal necesario comenzó esta simulación. En la Fig. 3 puede verse una secuencia de fotografías de la ejecución ensayo de ensayo.



Fig. 2. Simulador elegido (a), dispositivo montado (b) y disposición del sensor (c)



Fig. 3. Simulación de fuego real en los prototipos - columnas.

2.4 Procedimientos de los ensayos

Los ensayos de resistencia a la compresión axial, resistencia a la tracción por flexión, resistencia a la tracción por compresión diametral (ensayo brasileño), pérdida de masa y velocidad del pulso ultrasónico (UPV) se realizaron a posteriori. También se realizaron análisis en nivel macro y de microescala en las probetas.

La verificación del hormigón sometido a altas temperaturas comenzó por un análisis visual, observándose *spalling* y cambio de color. Se generaron imágenes de fragmentos de probetas a una profundidad de 1 cm a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM), con el objetivo de verificar la zona de transición entre el árido y la matriz de cemento y, principalmente, la interacción de las fibras en el hormigón y la permanencia o no de ellas bajo las altas temperaturas.

Las probetas de hormigón se sometieron al ensayo de resistencia a la compresión axial, siguiendo el procedimiento de NBR 5739 (ABNT, 2007), después tener sido sometidas a temperaturas elevadas. El ensayo de resistencia a la tracción por flexión se realizó de acuerdo con los estándares encontrados en NBR 12142 (ABNT, 2010), empleándose el principio de viga simplemente soportada con dos fuerzas concentradas en los tercios del tramo. Para complementar el análisis de los ensayos mecánicos destructivos, también se realizó el ensayo de resistencia a la tracción por compresión diametral (ensayo brasileño). El ensayo siguió las normas de NBR 7222 (ABNT, 2011).

La pérdida de masa se obtuvo por la relación entre la diferencia de masa de la probeta antes y después de ser sometida a temperatura elevada y la masa antes de la combustión, siendo el resultado expreso como un porcentaje. Los ensayos no destructivos para determinar la velocidad de propagación de las ondas longitudinales obtenidas por pulsos ultrasónicos a través de las muestras de hormigón se realizaron con base en NBR 8802 (ABNT, 2013), donde se empleó la transmisión directa entre transductores.

3. RESULTADOS

Para hormigones sometidos a diferentes temperaturas en el horno de mufla, se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos en los ensayos para verificar si realmente hay una diferencia estadística en un intervalo de confianza del 95%, lo que refleja un nivel de significancia de 0,05. Se utilizó el análisis de varianza (ANOVA), seguido de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey. En el primer momento, se analizaron por separado los resultados de las altas temperaturas en la mufla, y en el segundo momento se realizó la comparación con la prueba de fuego con llama directa.

No hubo *spalling* en ninguna probeta analizada. Como la temperatura y la humedad se controlaron durante el curado, se observó que en condiciones climáticas normales encontradas en Espirito Santo - Brasil, el *spalling* se mitigaba, incluso en el caso de hormigones con resistencia superior a 50 MPa - hormigón clase II (ABNT, 2015b).

A partir de un análisis general, que se mostrará en los siguientes tópicos, se observaron mayores pérdidas porcentuales después del rango de 500°C. Esto se explica por el hecho de que el calor pasa a través de la conducción dentro del espécimen y las transformaciones de la microestructura del hormigón que ocurren durante el calentamiento son más agresivas después de este rango (Ma et al., 2015; Castellote et al., 2004; Eurocódigo EN, 2004; Khoury, 1992).

3.1 Microestructura de hormigón

A partir de las imágenes generadas, la interacción de la fibra se consideró satisfactoria. En las pruebas de mufla en el rango de 700°C, no se observaron la presencia de fibras en ninguna mezcla, lo que era de esperar ya que el punto de fusión de todas las fibras no excedía los 500 ° C como se muestra en la Tabla 1.

La figura 4 muestra las imágenes SEM de los hormigones después de haber sido sometidos a una temperatura de 500°C en el horno de mufla.

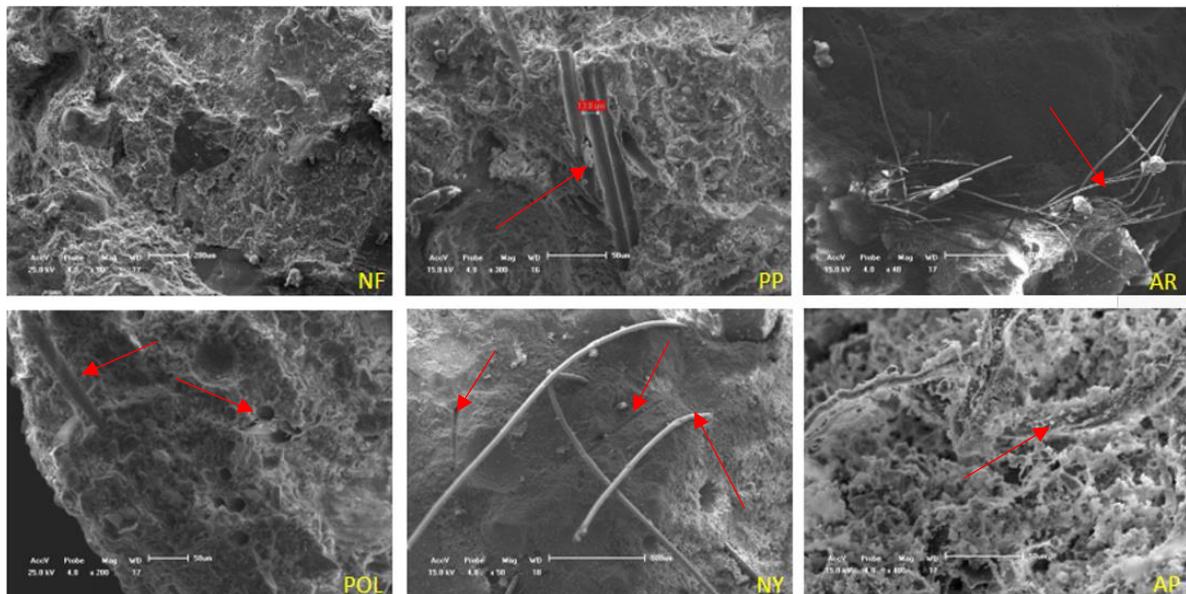


Fig. 4. MEV de hormigones después de ser sometidos a una temperatura de 500°C

Se observa que PP y POL no contenían más fibras después de 500°C, que AR y AP no perdieron las fibras en su totalidad y en NY hubo fusión parcial de las fibras. La temperatura aplicada fue de 500°C, pero vale la pena recordar que el calor del hormigón pasa a través de la conducción y es por eso que algunas fibras de la parte interior de NY permanecieron y otras no, es decir, en el punto analizado la temperatura interna del hormigón estaba cerca de 260°C. Las flechas en la Fig. 4 muestran esto. Las flechas indican la presencia o el vacío de las fibras en cada tipo de hormigón sometido a altas temperaturas.

Más tarde se verá que NF y AP fueron los hormigones que mostraron *spalling* en el ensayo del simulador. Correlacionándose con el análisis MEV, se verifica que la falta de porosidad para liberar vapor de agua influyó en el *spalling* de NF. En AP, la alta fibrilación de pulpa de aramida, la concentración de superficie y el hecho de que no se fundió fueron factores determinantes para no aumentar la porosidad del hormigón. Una explicación más detallada será realizada en el tópico del ensayo de simulador de fuego real.

3.2 Prueba de fuego en parrilla

Los sensores de termopar tipo K midieron el comportamiento de la evolución real de la temperatura a lo largo del tiempo en los ensayos directos (llama directa) y de simulación de incendio. Se observa que el comportamiento es bastante diferente de la curva estándar ISO 834 de un horno eléctrico. Esta diferencia se puede ver en la figura 5.

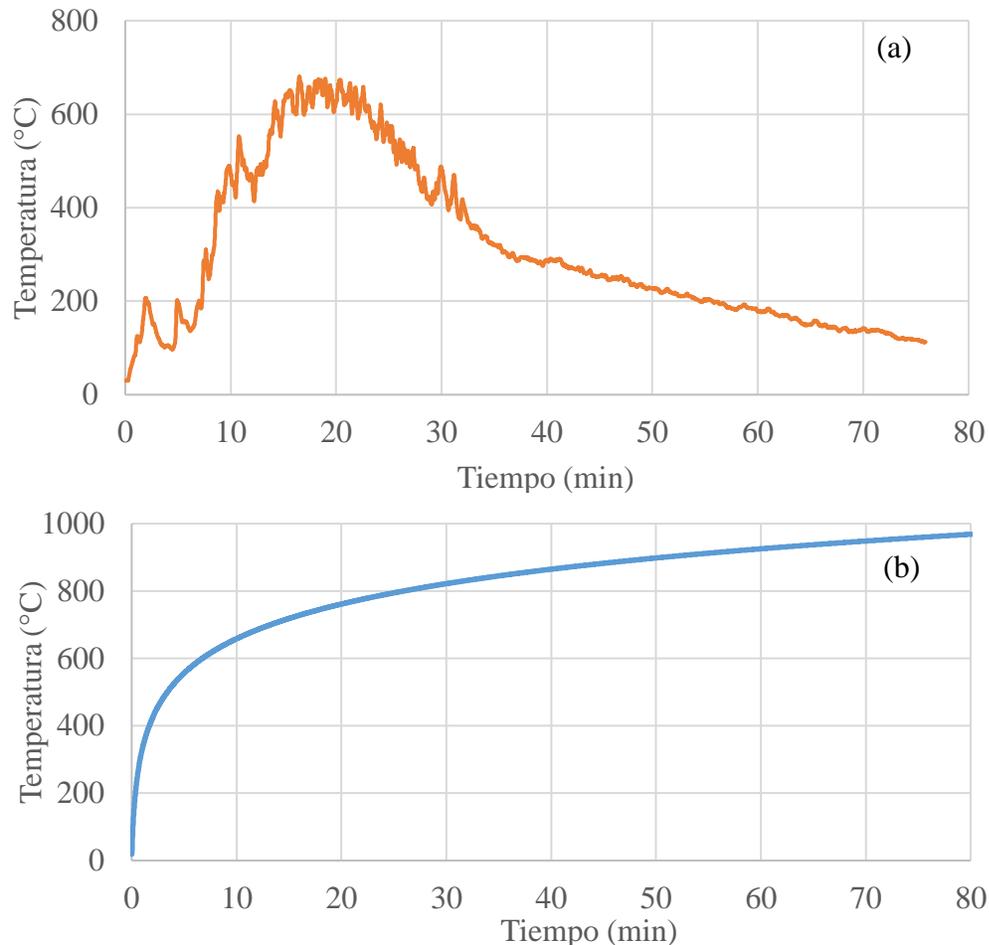


Fig. 5. Temperatura x tiempo en el ensayo de fuego en la parrilla (a) y la curva ISO 834 (b)

Como se observa en el gráfico, en el ensayo de fuego en la parrilla se observaron las fases de combustión del compartimento, es decir, los ensayos mostraron el punto de ignición, la fase de crecimiento, con o sin combustión generalizada, el punto de máximo y el decaimiento debido a la falta de material combustible. Comportamiento diferente al que se encuentra en los ensayos de mufla. Otro punto divergente es el patrón de calentamiento de la probeta. El calor se pasa por conducción a la probeta. En un incendio, sometido al fuego directo con mayor frecuencia tiene un patrón. En la quema en mufla, todos los lados transfieren energía por igual a la probeta. En la Fig. 6 se observa en las imágenes de termografía cómo se pasa el calor en los dos tipos de ensayos realizados.

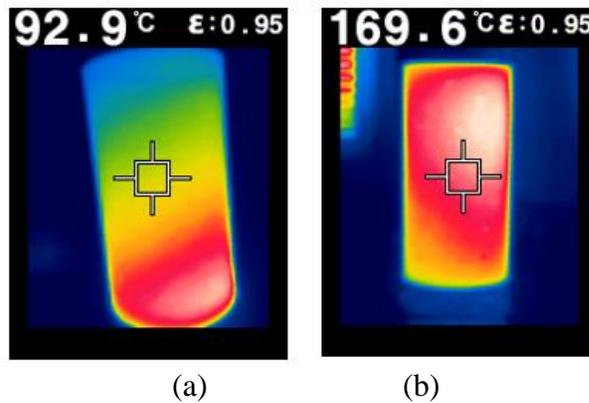


Fig. 6. Probeta en fase de enfriamiento inmediatamente después de la quema en la parrilla (a) y poco después de ser sometida a 500°C en horno de mufla (b)

La figura 6 (a) muestra un gradiente de temperatura bien definido, que muestra puntos calientes en el fondo de la muestra donde se concentró la carga de fuego. La figura 6 (b) muestra que el calentamiento de la muestra es casi uniforme, como se esperaba, ya que la mufla se calienta por todos lados. La mayoría de los incendios reales tienen un frente de fuego establecido, es decir, el ensayo de fuego en la parrilla fue más efectivo en este sentido.

Otra información importante es que, aunque la parrilla alcanza temperaturas superiores a de la mufla a 500°C, por ejemplo, la temperatura de la cara de la probeta en la mufla era más alta que la probeta en la parrilla, lo que demuestra que la radiación de energía térmica en la mufla es más grande.

Los ensayos de hormigones sometidos a altas temperaturas a través de muflas pueden ser reproducibles, pero no representan la realidad de un incendio en el compartimento y son mucho más severas que los ensayos de fuego de carga finita.

3.3 Resistencia a la compresión axial

Los datos de resistencia a la compresión axial de los hormigones ensayados con mufla fueron sometidos a ANOVA. Se observó que el efecto aislado del tipo de hormigón (NF, PP, POL, NY, AR y AP) y de la variación de temperatura (23, 300, 500 y 700°C) fueron significativos, así como la interacción entre las dos variables. La figura 7 muestra la resistencia a la compresión axial en función de la temperatura de los hormigones analizados.

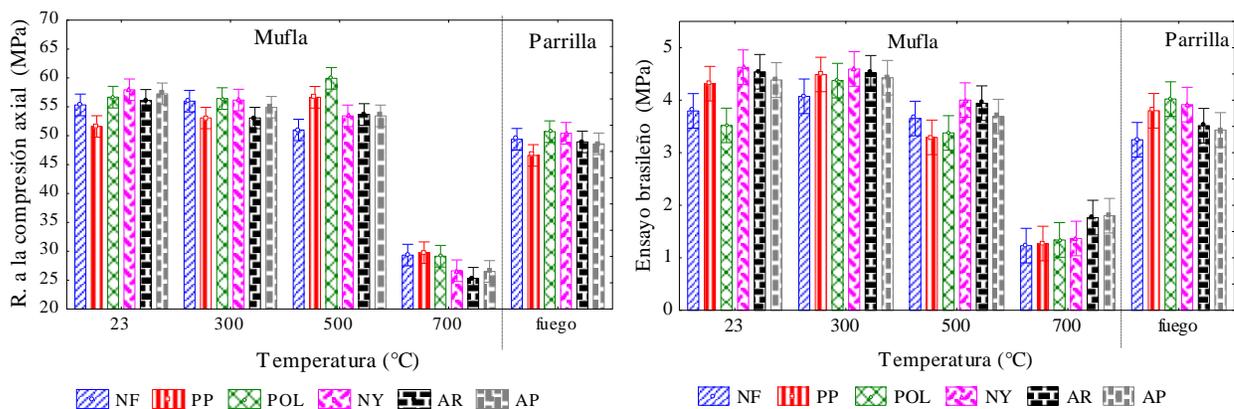


Fig. 7. Resistencia a la compresión axial (a) y ensayo brasileño (b) en función de la temperatura de la mufla y la parrilla.

Analizando el ensayo en mufla, se observa que de 23°C a 500°C casi no hay cambio en la resistencia a la compresión. A 700°C hay una caída promedio de aproximadamente el 50,2% de

esta propiedad mecánica en comparación con la temperatura ambiente. Este comportamiento puede explicarse por el rango de temperatura en el que ocurren transformaciones importantes en el hormigón, como lo demuestran Castellote et al. (2004)

Después de la realización de la ANOVA, se concluye que existe una diferencia entre los grupos de hormigón sometidos a diferentes temperaturas, sin embargo, solo con este análisis no es posible señalar si la diferencia ocurre dentro del grupo o entre los grupos. Se puede usar una prueba de comparación múltiple cuando hay una diferencia, ya que completa el análisis al comparar y mostrar el resultado de todos los pares promedio. Para esto, se utilizó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey.

Después de la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, se concluyó que:

- La resistencia a la compresión axial NF no ha cambiado dentro del rango de 300°C. PP mostró el mismo comportamiento;
- La resistencia del POL no cambió hasta 500°C;
- Hasta 300°C, la resistencia a la compresión de NY es la misma. Entre 300-500°C no hubo cambio en la resistencia. El AP tuvo el mismo comportamiento;
- Para AR entre 300-500°C, la resistencia es la misma, así como el valor en temperatura ambiente es lo mismo que a 500°C.

Analizando el ensayo de fuego de la parrilla, los resultados muestran que el efecto de la alta temperatura a través de la mufla es más severo para el hormigón. Aunque la temperatura final del ensayo de fuego en parrilla alcanza casi 700°C, los valores obtenidos para la resistencia a la compresión axial de la mufla a 700°C son en promedio el 55% de los resultados en la parrilla.

3.4 Resistencia a la tracción por la flexión

Al realizar el ANOVA, se observó que las fibras y la temperatura influyen independientemente en el comportamiento de la resistencia a la flexión en el hormigón. La temperatura fue la variable de mayor impacto seguida por el tipo de hormigón (adición de fibra), pero la interacción entre estas dos fuentes de variación, el tipo de hormigón y la temperatura, no fue significativa, ya que el valor de P fue mayor a 0,05.

3.5 Resistencia a la tracción por compresión diametral – ensayo brasileño

Se observó que no hubo cambios en el resultado hasta el rango de 300°C en comparación con la temperatura ambiente, y el valor medio de resistencia disminuyó en un 12,9% en el rango de 500°C y un 65,2% a 700°C.

Verificase significación al analizar las fuentes de variación del tipo de hormigón y la temperatura de forma independiente, así como la interacción entre las variables fue significativa con un intervalo de confianza del 95%. La figura 7b presenta el gráfico de la resistencia a la tracción por compresión diametral en función de la temperatura.

Se observó que NY, AR y AP presentaron promedios más altos que NF, PP y POL. Aunque sea una prueba que puede presentar mayores variaciones de resultados que las otras dos pruebas presentadas anteriormente (resistencia a la compresión axial y resistencia a la tracción a la flexión), cabe destacar que las características de la fibra pueden haber influido en los resultados. Una vez más, la temperatura fue la variable con mayor impacto. Después de la prueba de comparaciones múltiples, se encuentra que a 700°C no hay diferencia entre los hormigones analizados. Se sugiere que la orientación de la fibra puede haber interferido con los resultados, porque en esta prueba el POL obtuvo el resultado promedio más bajo mientras que el AR obtuvo el más alto. En el ensayo de resistencia a la compresión, esta lógica se invirtió, es decir, el POL obtuvo el resultado promedio más alto y el AR el peor. Dado que estas muestras cilíndricas se moldearon en las mismas condiciones, se presume que la orientación de la fibra puede haber influido en el resultado. Los resultados obtenidos en el ensayo de fuego de la parrilla se encuentran cerca de los obtenidos en el horno de mufla a 500°C.

3.6 Pérdida de masa

Los resultados de pérdida de masa fueron significativos para un intervalo de confianza del 95%. A partir de 300°C, la temperatura ya influye en la pérdida de masa de los hormigones ensayados. Tanto en este rango de temperatura, donde la mayor parte de la pérdida de masa corresponde al agua libre compuesta, como a 700°C, donde ya se ha liberado toda el agua libre, ya se han producido muchas transformaciones químicas, ya han aparecido fisuras considerables y el hormigón ya ha perdido gran parte de su característica estructural (Ma et al., 2015).

En el rango de 500°C, NF tuvo la pérdida de masa más baja que los otros hormigones. Este rango de temperatura es suficiente para fundir gran parte de las fibras, proporcionando el aumento de poro esperado, pero aún no es suficiente para realizar todas las transformaciones químicas del concreto. El gráfico de la pérdida de masa en función de la temperatura se encuentra en la figura 8a.

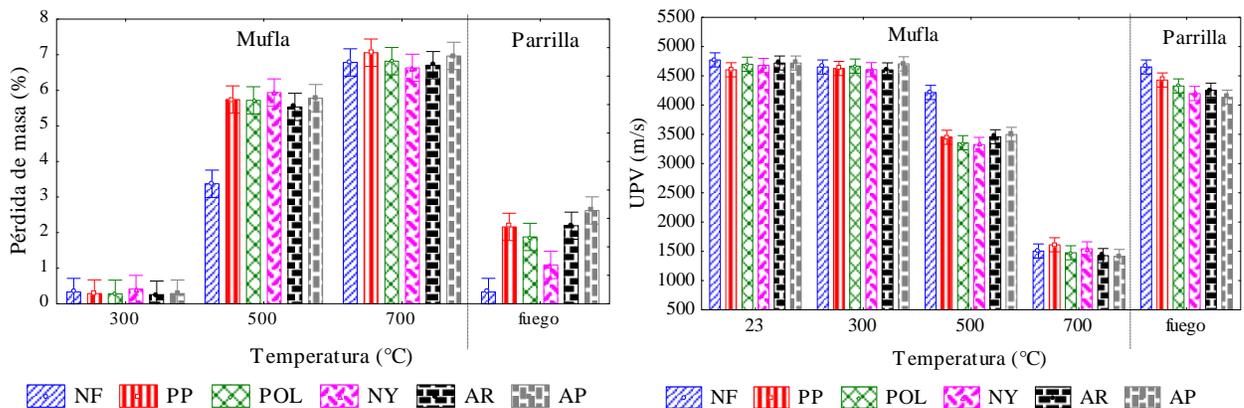


Fig. 8. Pérdida de masa (a) y UPV (b) en función de la temperatura.

Aunque la temperatura final de la prueba final de fuego de la parrilla alcanza casi 700 ° C, el hormigón muestra menos pérdida que el hormigón a 500°C en mufla, como se puede ver en la pérdida de masa y los resultados de UPV.

3.7 Velocidad de propagación de ondas ultrasónicas

La figura 8b muestra el resultado esperado, es decir, se sugiere la existencia de fisuras e incluso la ampliación de poros a medida que aumenta la temperatura.

Por análisis gráfico, se verifica que hasta 300°C no hubo aumento en las fisuras capaces de presentar diferencias en el análisis de ultrasonido. El método de ensayo no destructivo para determinar la velocidad de propagación de ondas longitudinales, obtenido por pulsos ultrasónicos a través de un componente de hormigón, tiene como una de sus principales aplicaciones la detección de fallos internos de hormigonado, profundidad de fisuras y otras imperfecciones (ABNT, 2013). Debido a la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima alcanzada y el enfriamiento utilizado, a 300°C, no se detectó pérdida de humedad. A 500°C, NF exhibió una velocidad más alta que el hormigón de fibra, y la temperatura de 700°C fue suficiente para obtener el mismo resultado en todos los hormigones analizados.

Estos números muestran que la temperatura no es la única variable que influye significativamente en los resultados del mismo hormigón después de condiciones severas, ya que el flujo de calor, el frente de incendio y la carga de fuego son esenciales para determinar el comportamiento. Los ensayos den mufla, si bien son importantes para fines de comparación, no representan la realidad de un incendio real y otros ensayos, como el ensayo de incendio real, pueden complementar el análisis.

3.8. Ensayo en simulador de fuego real

La Figura 9 muestra los índices de temperatura en función del tiempo para cada uno de los sensores que controlaron el incendio en el simulador de fuego.

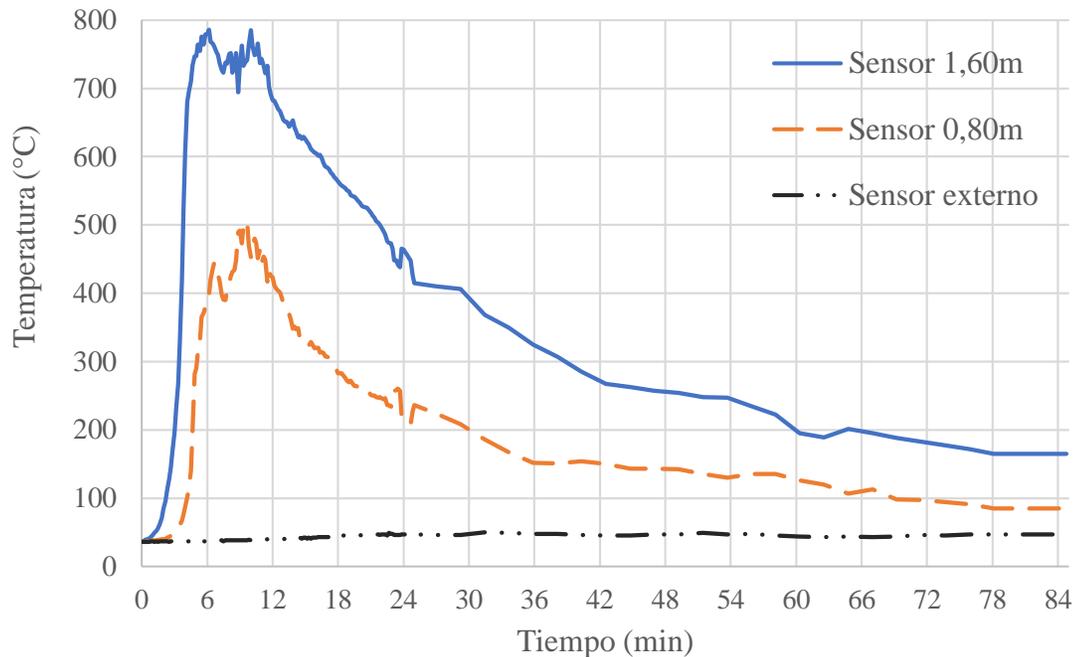


Fig. 9. Temperatura x tiempo en el simulador de fuego para los tres sensores.

La temperatura promedio en el sensor fuera del contenedor fue de 42°C. De hecho, el fuego tuvo un comportamiento extremo en el simulador, porque en solo 6 minutos después del inicio del fuego, la temperatura en el contenedor alcanzó su rango máximo de 786°C en el sensor ubicado a 1,60 m. Los primeros 2 minutos fueron de combustión lenta solo en el centro de ignición del material y una gran cantidad de humo blanco (vapor de agua de madera). Con 4 minutos de simulación, ya había una quema general de los pallets centrales y las llamas tocando el techo. En 5 minutos, quedó claro que el humo blanco comenzó a ponerse gris. A partir de entonces, el comportamiento comenzó a cambiar. En 6 minutos, el humo ya era gris claro y ya ocupaba toda la puerta. En ese momento, la madera del fondo comenzó a arder. A los 10 minutos hubo un incendio general en el fondo y la madera del techo. A los 11 minutos, el humo generado ya estaba turbio, casi de color marrón caqui, una característica de combustión incompleta, lo que significa que todavía había mucho material combustible transportado en el humo. Tanto es así que en el momento de la prueba de hasta 12 minutos, el humo se quemó, con la aparición de llamas fuera del contenedor (este momento se llama "flash"). Es por eso que puede ver casi un segundo pico de aumento de temperatura en el sensor superior. Después de una quema generalizada, a los 13 minutos el humo era gris oscuro. A los 23 minutos, se verifica una quema lenta solo en el centro (el restante del material combustible). Después de eso, la curva de temperatura continúa disminuyendo. Este es un comportamiento real de un incendio.

Después del ensayo y el enfriamiento total del sitio, se realizó un análisis visual de cada prototipo-columna al día siguiente. La figura 10 muestra las columnas uno al lado del otro. Las marcas hechas en las imágenes de la columna muestran el *spalling* que ocurrió en algunos de los hormigones.



Fig. 10. Columnas después de haber sido expuestas al fuego. Observar NF y AP después del fuego, mostrando la parte superior (a), el centro (b) y la base (c).

Se observó que NF era el que tenía la mayor *spalling*, seguido del AP. AR también tenía un ligero *spalling* en la base. Las columnas PP y POL no mostraron *spalling*, es decir, los daños no se observaron en el análisis visual. Tales hormigones solo mostraban marcas de quema provenientes de la madera. Al menos una cara de cada columna tiene esta marca de quema, una característica muy común que se encuentra en los incendios debido a la quema incompleta de materiales combustibles.

De este análisis se concluye que las fibras poliméricas disminuyen la incidencia de *spalling* en el hormigón y que las fibras con temperatura de fusión más baja son más eficientes porque se funden a temperaturas más bajas y abren poros, liberando así vapor de agua en el interior del hormigón.

Las fibras poliméricas de alto rendimiento, como fue el caso de la aramida, no fueron eficientes en materia de *spalling*. La pulpa de aramida, al ser más pequeña y crear más redes de fibra entrelazadas, no se derritió antes del rango de 500°C y no liberó los poros, ofreciendo resistencia para el hormigón. Este hecho fue esencial para la aparición de *spalling*.

La figura 10 también muestra los detalles de las columnas más afectadas. Se observaron *spallins* de superficie y bordes en NF y AP. Las principales influencias, además de la presencia de fibra en el caso de PA, son la permeabilidad del hormigón, la expansión térmica del árido, la presencia de refuerzo y la velocidad de calentamiento.

4. CONCLUSIÓN

En base a los resultados de este estudio experimental, se extraen las siguientes conclusiones:

- Los ensayos de fuego de carga de incendio estándar puede ser un análisis alternativo o complementario del análisis del hormigón sometido a temperaturas elevadas, ya que el ensayo de mufla no representa con precisión las condiciones encontradas en un incendio en un comportamiento real.
- La temperatura no es la única variable que influye significativamente en los resultados del hormigón después de condiciones severas, ya que el flujo de calor, el frente de incendio y la carga de incendio son esenciales para determinar el comportamiento, lo que indica que los ensayos complementarios son importantes para análisis más amplios
- Las fibras poliméricas disminuyen la incidencia de *spalling* en el hormigón y las fibras a menor temperatura de fusión (polipropileno y poliéster) son más eficientes ya que se funden a temperaturas más bajas y abren poros, liberando así vapor de agua dentro del hormigón. Las fibras poliméricas consideradas de alto rendimiento, como la aramida, no fueron eficientes en términos de *spalling*.

- Aunque el ensayo de fuego en parrilla alcanzó una temperatura cercana a los 700°C, los hormigones tenían menos fisuras que los hormigones de mufla a 500°C.
- En los ensayos mecánicos realizados después de 700°C, los resultados obtenidos fueron los mismos estadísticamente para todos los hormigones, lo que confirma que todas las transformaciones importantes en el hormigón ya han sucedido, las fibras ya se han derretido y las fisuras importantes ya se presentan en este rango de temperatura.
- El simulador de fuego proporcionó el comportamiento de fuego más extremo y, por lo tanto, fue posible observar el *spalling* del hormigón de algunas columnas, lo que indica que el tipo de curado, el tamaño de la probeta, la presencia de fibras y el tipo de quema influyen en el comportamiento del hormigón sometido a la acción del fuego.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Departamento de Bomberos Militares del Estado de Espírito Santo (CBMES)- Vitória - Brasil, al Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción (LEMAC) del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Espírito Santo (UFES) y la empresa Concrevit. Además, nos gustaría agradecer a la Fundación de Apoyo a la Investigación e Innovación Espírito Santo (FAPES) por su apoyo financiero.

6. REFERENCIAS

- ABNT Brazilian association of technical standards. (1998). *NBR NM 67: Concrete - Slump test for determination of the consistency*. Rio de Janeiro.
- ABNT Brazilian association of technical standards. (2000). *NBR 14432: Fire-resistance requirements for building construction elements - Procedure*. Rio de Janeiro.
- ABNT Brazilian association of technical standards. (2007). *NBR 5739: Concrete - Compression test of cylindrical specimens - method of test*. Rio de Janeiro.
- ABNT Brazilian association of technical standards. (2010). *NBR 12142: Concrete - Determination of tension strength in flexure of prismatic specimens*. Rio de Janeiro.
- ABNT Brazilian association of technical standards. (2011). *NBR 7222: Concrete and mortar - Determination of the tension strength by diametrical compression of cylindrical test specimens*. Rio de Janeiro.
- ABNT Brazilian association of technical standards. (2013). *NBR 8802: Hardened concrete — Determination of ultrasonic wave transmission velocity*. Rio de Janeiro.
- ABNT Brazilian association of technical standards. (2015a). *NBR 5738: Procedure for molding and curing concrete test specimens*. Rio de Janeiro.
- ABNT Brazilian association of technical standards. (2015b). *NBR 8953: Concrete for structural use - Density, strength and consistence classification*. Rio de Janeiro.
- ABNT Brazilian association of technical standards. (2018). *NBR 16697: Portland cement - Requirements*. Rio de Janeiro.
- ACI Committee on Fireproofing (2019). Report of committee on fireproofing (1919).
- Akca, A. H., Zihnioglu, N.Ö. (2013). *High performance concrete under elevated temperatures*. Constr. Build. Mater. 44, 317–328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.005>
- Alhozaimy, A. M., Soroushian, P., Mirza, F. (1996). *Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials*. Cem. Concr. Compos. 18, 85–92. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00003-8](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00003-8)
- ASTM International. (2018). *ASTM E119-18a, Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*. <https://doi.org/10.1520/E0119-18A>
- Bangi, M. R., Horiguchi, T. (2012). *Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures*. Cem. Concr. Res. 42, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.014>

- Behnood, A., Ghandehari, M. (2009). *Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures*. Fire Saf. J. 44, 1015–1022. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.07.001>
- Bei, S., Zhixiang, L. (2016). *Investigation on spalling resistance of ultra-high-strength concrete under rapid heating and rapid cooling*. Case Stud. Constr. Mater. 4, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.04.001>
- Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., Campo, J. (2004). *Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction*. Cem. Concr. Res. 34, 1633–1644. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00229-1)
- Choumanidis, D., Badogiannis, E., Nomikos, P., Sofianos. (2016). *The effect of different fibres on the flexural behaviour of concrete exposed to normal and elevated temperatures*. Constr. Build. Mater. 129, 266-277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.089>
- Cree, D., Green, M., Noumowé, A. (2013). *Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review*, Constr. Build. Mater. 45, 208–223. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.005>
- Çavdar, A. (2013). *The effects of high temperature on mechanical properties of cementitious composites reinforced with polymeric fibers*, Compos. Part B Eng. 45 (2013) 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.033>
- Dias, D., Calmon, J., Degen, M. (2017). *Concreto reforçado com fibras poliméricas submetido a temperaturas elevadas*. In: Congresso Brasileiro do Concreto-2017, 59, 2017, Bento Gonçalves, RS. Anais... São Paulo: IBRACON.
- Drzymała, T., Jackiewicz-rek, W., Tomaszewski, M., Kuś, A. (2017). *Effects of High Temperature on the Properties of High Performance Concrete (HPC)*, Proc. Eng. 172, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.108>
- EN 1992-1-2. (2004). *Eurocode 2 – Design of Concrete Structures. Part 1.2: General Rules – Structural Fire Design*, p. 97.
- Espírito Santo. Corpo De Bombeiros Militar Do Estado. (2009). *Norma Técnica 04 – Carga de incêndio*. Vitória: CBMES.
- Ezziane, M., Kadri, T., Molez, L., Jaubertie, R., Belhacen, A. (2015). *High temperature behaviour of polypropylene fibres reinforced mortars*. Fire Saf. J. 71, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.11.022>
- Gernay, T., Franssen, J.M. (2015). *A performance indicator for structures under natural fire*. Eng. Struct. 100, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.005>
- Haddad, R. H., Al-Saleh, R. J., Al-Akhras, N. M. (2008). *Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete*. Fire Saf. J. 43, 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.11.002>
- Hartin, E. (2008). *Extreme Fire Behavior: Understanding the Hazards*. 2008. Access in: <<http://cfbt-us.com/pdfs/ExtremeFireBehavior.pdf>>. Acess 17 fev. 2018.
- ISO 834-1:1999 (2015). *Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1: General Requirements*.
- Khalaf, J., Huang, Z. (2016). *Analysis of the bond behaviour between prestressed strands and concrete in fire*. Constr. Build. Mater. 128, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.016>
- Khoury, G. A. (1992). *Compressive strength of concrete at high temperatures : a reassessment*. Magazine of Concrete Research 44 (161), 291–309.
- Kim, Y., Lee, T., Kim, G. (2013). *An experimental study on the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete with high temperature and load*. Mater. Struct. 46, 607–620. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9918-y>
- Kurtz, S., Balaguru, P. (2000). *Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure*. Cem. Concr. Res. 30, 183–190. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00228-8)
- Lee, G., Han, D., Han, M.C., Han, C. G., Son, H. J. (2012). *Combining polypropylene and nylon fibers to optimize fiber addition for spalling protection of high-strength concrete*. Constr. Build. Mater. 34, 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.015>

- Lennon, T., Rupasinghe, R., Canisius, G., Waleed, N., Matthews, S. (2007). *Concrete structures in fire – Performance, design and analysis*. BRE 1-81.
- Lourenço, L. A. P., Barros, J. A. O., Alves, J. G. A. (2011). *Fiber reinforced concrete of enhanced fire resistance for tunnel segments*.
- Ma, Q., Guo R., Zhao, Z., Lin, Z., He, K. (2015). *Mechanical properties of concrete at high temperature-A review*. *Constr. Build. Mater.* 93, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3ed. <https://dx.doi.org/10.1036/0071462899>
- Noumowe, A. (2005). *Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 °c*. *Cem. Concr. Res.* 35, 2192–2198. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.007>
- Pai, S., Chandra, K. L. (2013). *Analysis of polyester fibre reinforced concrete subjected to elevated temperatures*. *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (IJCSEIERD)* 3 (2013) 1–10.
- Park, S.-J., Yim, H. J. (2016). *Evaluation of residual mechanical properties of concrete after exposure to high temperatures using impact resonance method*. *Constr. Build. Mater.* 129, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.116>
- Petrucci, E. G. R. (1981). *Concreto de cimento Portland*. 8 ed. Rio de Janeiro: Editora Globo.
- Pliya, P., Beaucour, A. L., Noumowé. (2011). *Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature*. *Constr. Build. Mater.* 25, 1926–1934. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.064>
- Poon, C. S., Shui, Z. H., Lam, L. (2004). *Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures*. *Cem. Concr. Res.* 34, 2215–2222. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.011>
- São Paulo. Corpo De Bombeiros Militar Do Estado. (2011). *Instrução Técnica 14 - Carga de incêndio nas edificações e áreas de risco*. São Paulo.
- Sekhar, M. P., Raju, K. (2017). *A Study on Effect of Mechanical Properties of Recron 3S Fibre Concrete on Different Grades Exposed to Elevated Temperatures*. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology* 4, 41–46.
- Shihada, S. (2011). *Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance*. *J. Civ. Eng. Manag.* 17, 259–264. <https://doi.org/10.3846/13923730.2011.574454>
- Song, P. S., Hwang, S., Sheu, B. C. (2005). *Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes*. *Cem. Concr. Res.* 35, 1546–1550. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>
- Srikar, G., Anand, G., Prakash, S. Suriya. (2016). *A Study on Residual Compression Behavior of Structural Fiber Reinforced Concrete Exposed to Moderate Temperature Using Digital Image Correlation*. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 10, 75–85. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0127-x>
- Suresh, N., Bindiganavile, V., Prabhu, M. (2014). *Compressive Behaviour of Polyester Fiber Reinforced Concrete Subjected To Sustained Elevated Temperature*. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 4, 220–224.
- Xiao, J., Falkner, H. (2006). *On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures*. *Fire Saf. J.* 41, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.11.004>
- Yermak, N., Pliya, P., Beaucour, A. L., Simon, A., Noumowé, A. (2017). *Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties*. *Constr. Build. Mater.* 132, 240–250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.120>