Análisis experimental de hormigones expuestos al fuego. Evaluación de variables hidro-térmicas

Jorge Arturo Capote-Abreu — Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos
Manuel Daniel Alvear-Portilla — Dr. Ingeniero Industrial
Jorge Crespo-Álvarez — Ingeniero Civil

Universidad de Cantabria. GIDAI. Dpto. Transportes y Técnología de Proyectos y Procesos.
Avda. Los Castros, s/n – 39005 Santander. Tfno: +34 942 201826.
jorge.crespo@unican.es

Recibido: 17/12/2010 • Aceptado: 05/07/2011

Experimental analysis of concrete exposed to fire. Assessment of hydro-thermal variables

ABSTRACT

• Conventional thermogravimetric analysis requires small sample volumes to perform the experiments and, in the case of concrete, it is very difficult to take into account the effects of aggregates and moisture migration during tests. In the present work, an experimental methodology inspired in thermogravimetric methods was developed. The methodology proposed permits to assess the behaviour of small concrete samples exposed to a fast unidirectional heating, taking into account the effects of aggregates and moisture. For validation purposes, three types of normal strength concretes under two different heat exposures have been analyzed. Cylindrical concrete samples of 150 x 300 mm were cast. After curing cylindrical cores of 95 millimetres in diameter were extracted and shaped to 48 ± 2 mm in height. The samples were exposed to a two different heat fluxes (35kW/m2 and 75kW/m2) for 30 or 60 minutes. Mass loss rate and temperatures were measured every 1 second. Additionally, the heat transfer process was also monitored using infrared thermography. Experimental results shows that the methodology proposed is suitable to evaluate different hydro-thermal processes that take place in concrete exposed to fire as the free water release, decomposition of calcium silicate hydrated and the decomposition of Porlandite. Initial moisture content of concrete plays a direct influence en mass loss rate at high exposure condition. No significant differences were observed at the lower heat flux. At the same exposure conditions, samples with lower moisture content shows lower mass loss rate.

• Key Words: concrete, experimental methodology, materials characterization, fire, physic-chemical transformation.

RESUMEN

El presente estudio presenta una metodología experimental inspirada en métodos termogravimétricos, la cual permite evaluar el comportamiento de muestras de hormigón expuestas a un flujo de calor unidireccional, considerando el efecto de los áridos y la humedad. Por el contrario, los análisis termogravimétricos convencionales requieren volúmenes muy pequeños del material para la realización de los ensayos: lo cual, en el caso del hormigón, imposibilita tener en cuenta el efecto de los áridos y la migración de la humedad en su interior.

A efectos de calibración y validación de la metodología propuesta se analizaron tres tipos de hormigones. Fueron confeccionadas probetas cilíndricas de 150 x 300 mm, de las cuales se extrajeron núcleos cilíndricos de 95 mm de diámetro. Estos núcleos fueron posteriormente cortados para formar probetas de 48 ± 2 mm de altura. Las muestras fueron expuestas a niveles de radiación térmica de 35kW/m^2 y 75kW/m^2 durante intervalos de 30 y 60 minutos, realizándose un muestreo de la pérdida de masa y las temperaturas en diferentes puntos de la probeta. Adicionalmente se monitorizó el proceso de transferencia térmica mediante termografía infrarroja.

Mediante el método propuesto fue posible determinar diferentes procesos hidro-térmicos en el hormigón como la expulsión del agua libre, la descomposición del silicato de calcio hidratado y la descomposición de la Portlandita. Los resultados mostraron que el contenido de humedad inicial ejerce una influencia directa en la velocidad de pérdida de masa de las muestras sometidas a elevados valores de flujo de calor. A valores de flujo de calor

bajos, la influencia es prácticamente nula, mientras que, en las mismas condiciones de ataque térmico, las muestras con menor contenido de humedad presentaron menor velocidad de pérdida de masa.

Palabras Clave: hormigón, metodología experimental, caracterización de materiales, incendio, transformaciones físico-químicas.

INTRODUCCIÓN

Incendios relevantes en túneles y estructuras, tales como los ocurridos en el *túnel del Canal de la Mancha* en 1996 (Francia-Inglaterra), el *túnel de Tauern* 1999 (Austria), el *túnel de Mont Blanc* 1999(Francia), el *Edificio Windsor* en 2005 (España), etc. han mostrado que las condiciones de exposición térmica de incendios confinados con una elevada carga de combustible y un incremento rápido de las temperaturas, pueden provocar afectaciones muy severas a las estructuras de hormigón, manifestándose diversos fenómenos como el desconchamiento explosivo (*spalling*): eso provoca una disminución súbita de la sección resistente, comprometiendo la integridad de la estructura y su capacidad para soportar las cargas actuantes.

Por otra parte, resulta cada vez más frecuente el empleo de nuevos tipos de hormigones (alta resistencia, autocompactantes, ultraalta resistencia, etc.) en la construcción. Estos hormigones, dada su baja permeabilidad y su elevada resistencia, son mucho más susceptibles a sufrir los efectos de un incendio que los hormigones convencionales, manifestándose una disminución mucho más aguzada de sus propiedades mecánicas con el incremento de las temperaturas y una mayor propensión a la ocurrencia de explosiones. En ese sentido, minimizar la ocurrencia de *spalling* constituye uno de los factores principales a tener en consideración durante la evaluación de la respuesta estructural de elementos de hormigón armado en caso de incendio.

En la actualidad, la naturaleza de la ocurrencia de explosiones en el hormigón, producto del ataque térmico, continúa siendo objeto de análisis en la comunidad científica, aunque existe un consenso más o menos generalizado que durante el calentamiento del hormigón ocurre simultáneamente un incremento de la presión de poros y un deterioro del material producto de los esfuerzos térmicos [1-3], atribuyéndose el carácter explosivo del fenómeno a la presión de poros.

Cuando el hormigón es sometido a elevadas temperaturas, este experimenta una serie de reacciones físico-químicas que afectan tanto a su microestructura como al contenido de humedad. Estos procesos termo-hídricos se refieren a una cinética particular que tiene lugar en el interior del elemento de hormigón cuando este se calienta [4-6].

Por una parte, la difusión de la temperatura a través del hormigón calienta el agua en el interior de los poros, causando su evaporación y el aumento, por consecuencia, de la presión. Para restaurar el equilibrio, se produce un transporte de vapor de agua hacia las zonas de baja presión (principalmente por mecanismos de gradiente de presión de tipo *Darcy*): 1) el vapor se evacua hacia el exterior por la superficie caliente, causando la pérdida de masa en el material, y 2) migra hacia el interior del elemento, donde comienza a condensarse en cuanto lo permiten las condiciones termodinámicas (presión, volumen y temperatura), formando gradualmente un frente casi saturado de agua líquida en las proximidades de la superficie expuesta (*moisture clog*), [4].

Este mecanismo termo-hídrico, responsable de la creación de la barrera saturada (*moisture clog*) y de la aparición de presiones de poros importantes, está fuertemente influenciado por las propiedades de transferencia del hormigón y, en particular, de la permeabilidad al gas. Además, en hormigones de baja permeabilidad, la eliminación de las moléculas de agua se ve severamente ralentizada (según la *ley de Darcy*), ofreciendo así, para un poro determinado, una mayor propensión a la generación de vapor, aumentando la presión de poros en su seno.

Actualmente, los análisis termogravimétricos (TGA) permiten evaluar fenómenos y transformaciones que se producen en los materiales con el incremento de la temperatura. Sin embargo, para el caso del hormigón, esta técnica no permite realizar el análisis conjunto de todos los materiales constituyentes ni el efecto de la migración de humedad en su interior, producto de las limitadas dimensiones de las muestras. En ese sentido, los estudios se han centrado fundamentalmente en el análisis por separado de los áridos [7,8] y la pasta de cemento [9,10].

En estudios recientes [11,12] se proponen análisis de pérdida de masa sobre muestras de mayores dimensiones sometidas a un proceso de calentamiento lento. Sin embargo, este tipo de enfoque no permite reproducir el carácter dinámico del fenómeno de transferencia de masa y energía en hormigones expuestos al fuego, en donde existen grandes gradientes de temperatura en el material. En ese sentido resulta necesario disponer de un método de ensayo capaz de reproducir más adecuadamente las condiciones de exposición térmica del material en condiciones de uso final, que permita realizar una evaluación más realista del fenómeno.

A falta de consenso entre los autores sobre la metodología más adecuada para cuantificar el incremento de la presión de poros en el hormigón y describir los procesos de transferencia de masa y energía, en el presente estudio se presenta una metodología inspirada en métodos termogravimétricos [13], basada en otras normativas y estudios de referencia [14-16]. El método propuesto permite analizar el comportamiento de hormigones sometidos a una agresión térmica unidireccional mediante el empleo de un calorímetro de pérdida de masa y una serie de termopares.

Este procedimiento permitió evaluar de manera simultánea la pérdida de masa, la velocidad de pérdida de masa y la evolución de las temperaturas en diversos puntos de la muestra en una sola medición sobre una muestra de pequeño tamaño. Adicionalmente, el proceso de transferencia

térmica que tiene lugar en las muestras ha sido monitorizado además mediante el empleo de termografía infrarroja.

1. MATERIAL Y MÉTODOS

1.1. MÉTODO DE ENSAYO

La metodología experimental propuesta se basa en el muestreo simultáneo de la pérdida de masa y la evolución de las temperaturas en muestras de hormigón sometidas a un ataque térmico unidireccional, generado mediante un quemador troncocónico que irradia calor como un cuerpo gris, basado en la configuración del método de ensayo del calorímetro de pérdida de masa[15].

El elemento calefactor del equipo tiene una emisividad de 0.99 y puede ser operado a una temperatura máxima de 1000ºC. Esta configuración garantiza una homogeneidad en el flujo de calor en toda la superficie de la cara expuesta de la muestra. La intensidad de flujo de calor entregado puede ser ajustada dentro del rango de 0.1 a 100 kW/m^2, permitiendo reproducir condiciones correspondientes a diferentes estadios de desarrollo del incendio.

La energía de radiación transferida por el quemador a la muestra está determinada por la Ec. (1):

$$q = A_1 F_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1)$$

Donde: A_1 es el área de la superficie emisora, $F_{1\to 2}$ es el factor de forma, T_1 es la temperatura del emisor, T_2 es la temperatura de la cara expuesta y s es la *constante de Stefan-Bolztman*.

El factor de forma es obtenido mediante la integración de la Ec. (2), dando para esta configuración de ensayo un valor de 0.73.

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2} \quad (2)$$

Donde: A_1 es el área de la superficie emisora, A_2 es el área de la cara expuesta de la muestra, φ_1 es el ángulo normal al plano de la superficie A_1, φ_2 es el ángulo normal al plano de la superficie A_2 y r es la distancia entre la superficie A_1 y A_2.

El equipo dispone de una célula de carga, con una precisión de 0,1 gramos y un rango de lectura de 0,1 a 2350 gramos a la cual se acopla un dispositivo para la colocación de la muestra mediante un vástago de acero. La altura del vástago es regulable, de forma tal que se garantiza que la separación de la muestra al quemador sea de 25 mm, tal como se muestra en el esquema de la Fig. (1).

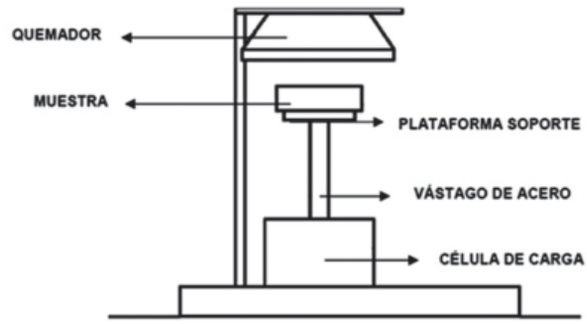

Fig. 1: Esquema de la configuración del ensayo

Previo a la realización de los ensayos, las muestras son instrumentadas mediante termopares tipo K lo cual permite el muestreo de las temperaturas en la superficie y el interior de la muestra según Fig. (2).

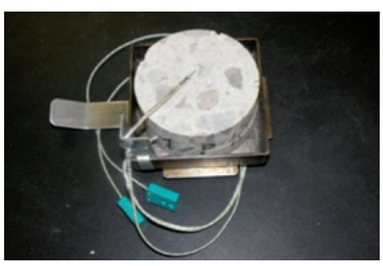

Fig. 2: Probeta colocada sobre el porta-muestras e instrumentada con termopares

Los datos de los termopares fueron recogidos con un tiempo de paso de 1 segundo para los ensayos. Los datos fueron recogidos mediante un equipo de adquisición de datos, procesándose para obtener las gráficas de variación de estos parámetros en el tiempo.

Durante el proceso de diseño del experimento se seleccionó un diseño completamente aleatorio con dos factores primarios (intensidad de ataque térmico y tiempo de exposición). El experimento compara los valores de las variables respuesta (pérdida de masa, velocidad de pérdida de masa y temperatura) basado en los diferentes niveles de los factores primarios. Estos niveles han sido asignados aleatoriamente a las unidades experimentales, entendiéndose por aleatoriamente que la secuencia de ejecución de las unidades experimentales es determinada al azar.

A partir del criterio anterior, se establecieron dos niveles para cada uno de los factores primarios. Se seleccionaron dos intensidades de ataque térmico: una relativamente baja de 35 kW/m^2 y otra relativamente alta de 75 kW/m^2 y dos tiempos de exposición: 30 y 60 minutos. El cálculo del tamaño de muestra para este tipo de diseño se realizó mediante la expresión:

$$N = k * L * n \quad (3)$$

Donde N es el número de ensayos, k es el número de factores, L es el número de niveles del factor primario y n es el número de réplicas del experimento.

Con el fin de maximizar la sensibilidad de los análisis estadísticos subsecuentes, el número de replicas debe ser el mismo para cada nivel del factor. Además, se ha tenido en cuenta que el número mínimo de réplicas está también condicionado por el procedimiento metodológico del calorímetro de pérdida de masa. En ese sentido, el procedimiento establece el ensayo de tres muestras como mínimo por material para una adecuada caracterización. La Tabla 1 muestra un resumen del número de muestras considerando dos factores primarios con dos niveles y tres réplicas por experimento.

Dimensiones de la muestra	Nº de muestras para ensayo de calorimetría		
95 x 50 mm	Flujo de calor	35 kW/m²	75 kW/m²
Tipo de Ensayo	Texp: 30 min	3	3
	Texp: 60 min	3	3
Total	12		

Tabla 1: Número de muestras mínimas para los ensayos a diversos flujos de calor

1.2. MATERIALES

A efectos de calibración y validación de la metodología propuesta se realizaron una serie de pruebas preliminares sobre muestras de tres hormigones confeccionados con áridos calizos los cuales han sido designados como G, H y P.

En la Tabla 2 se presenta un resumen con las principales características de los tres hormigones empleados en los estudios.

Para la confección de las muestras se emplearon moldes cilíndricos estándares de 150 x 300 mm. Una vez hormigonadas, las probetas fueron mantenidas en el molde durante 24 horas sumergidas en agua a una temperatura de 23º ± 2ºC. Posteriormente fueron transferidas a un ambiente de temperatura y humedad controlada ≥ 95 % HR y 20ºC ± 2ºC, según UNE-EN 12390-2:2009 hasta los 28 días de edad, fecha en la cual se procedió a su envío al laboratorio.

Una vez recibidas las probetas y a fin de ajustarlas a las condiciones requeridas para los ensayos se procedió a la extracción de testigos cilíndricos de 95 mm de diámetro y 300 mm de longitud. Estos testigos fueron posteriormente cortados de manera tal que la altura de los especímenes estuviese dentro del rango de 48 ± 2 mm tal como se muestra en la Fig. (3).

Fig. 3: Muestras obtenidas a partir de la extracción y corte de testigos

Una vez cortadas las muestras fueron conservadas a una temperatura de 25 ºC ± 2ºC y 50 % ± 3 % de humedad relativa hasta los 90 días de edad, tras lo cual se procedió a la realización de los ensayos.

1.3. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

El método de ensayo propuesto permite el análisis de muestras de pequeño tamaño (dimensiones máximas de 100 x 100 x 50 mm³ y peso máximo 2 Kg.).

Los termopares tipo K fueron ubicados en la cara de la probeta expuesta a la radiación del quemador troncocónico, y en el interior, a 25 mm de la cara expuesta, a fin de poder realizar un perfil de la penetración térmica que se produce en la muestra en función del tiempo.

Para la colocación del termopar en el centro de la muestra se perforó un orificio mediante un taladro de 2.5 mm de diámetro y 45 mm de profundidad. Los termopares fueron colocados y fijados en su posición mediante un dispositivo de sujeción, teniendo especial cuidado de que los termopares no quedasen demasiado tirantes y esto afectase las lecturas de pérdia de masa.

Designación	Tipo de Hormigón	f'c [N/mm²]	$T_{Máx}$ Árido [mm]	Cemento (kg)	Agua (kg)	Relación a/c	Agua de Hidratación (kg) (estimada)*	Contenido de Humedad (%) (estimada)
G	HA-25	36.4	10	300	162	0.54	58.4	4.02
H	HA-25	33.6	20	300	171	0.57	58.4	4.28
P	HA-30	43.7	20	400	180	0.45	77.9	3.89

* $$M_{hyd} = 0.21 M_{cem} \left(\frac{Edad}{23 + Edad} \right)^{1/3}$$

Tabla 2: Características de los hormigones empleados

Los ensayos fueron realizados siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- Previamente a la realización del ensayo, se procedió a la realización de un control visual y fotográfico de las muestras a fin de detectar anomalías en las mismas.
- Se procedió a la colocación de los termopares en la posición indicada y se configuraron los equipos de adquisición de datos para la identificación y el tratamiento posterior de los resultados.
- Posteriormente se procedió a la colocación del portamuestras con la muestra y el dispositivo de sujeción de los termopares sobre la célula de carga, comprobándose que el cable de termopar no interfiriese en el muestreo de la masa.
- Una vez configurados los equipos de adquisición de datos y calibrado, el flujo del quemador se dio inicio al ensayo, iniciando de manera sincronizada la toma de datos de pérdida de masa, temperaturas mediante termopares y termografía infrarroja y la grabación en video de todo el ensayo.
- Se dio la instrucción a los operarios de que, en caso de ocurrencia de algún suceso extraordinario (ocurrencia de *spalling* o cualquier otro), pulsasen la tecla correspondiente en el software de adquisición de datos para que quedase registrado en el tiempo.
- Una vez alcanzado el tiempo previsto para cada uno de los ensayos, se procedió a cerrar el *shutter* del quemador, deteniéndose la adquisición de datos provenientes de la célula de carga, los termopares y la cámara termográfica.
- Finalizada la adquisición de los datos, las muestras fueron retiradas del equipo y dejadas enfriar a temperatura ambiente. Posteriormente se realizó una nueva inspección visual y fotográfica de las muestras, señalándose las áreas afectadas mediante un rotulador para su mejor identificación.

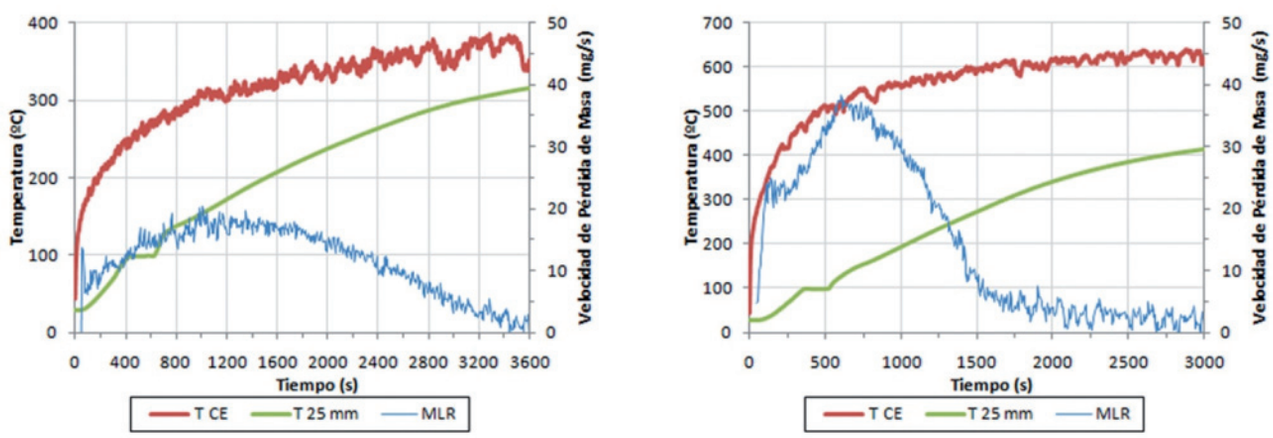

Fig. 4: Velocidad de pérdida de masa y temperaturas experimentadas por el hormigón G durante los ensayos a flujos de calor de 35 kW/m2 (izquierda) y 75 kW/m2 (derecha)

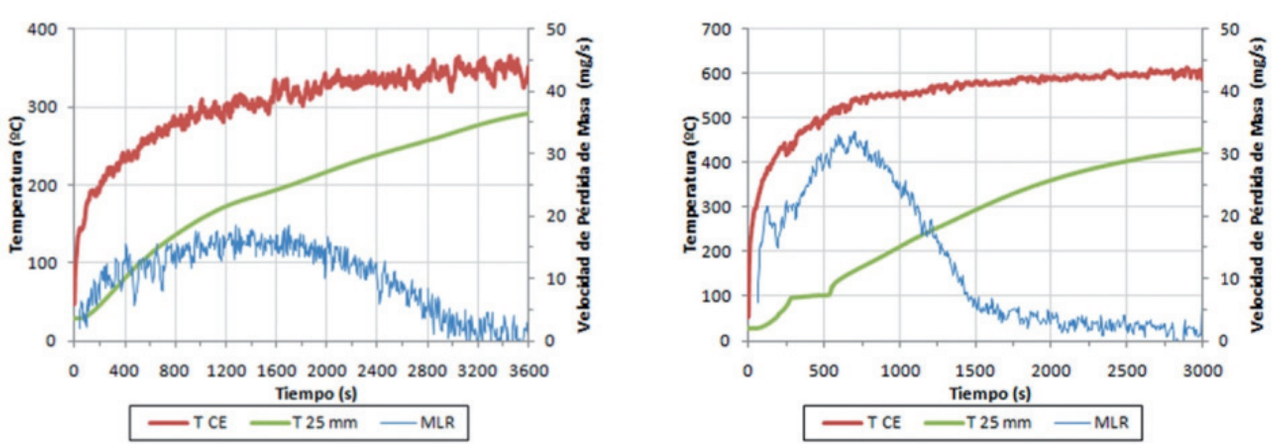

Fig. 5: Velocidad de pérdida de masa y temperaturas experimentadas por el hormigón H durante los ensayos a flujos de calor de 35 kW/m2 (izquierda) y 75 kW/m2 (derecha)

2. RESULTADOS

En las Fig. (4, 5 y 6) se muestran las gráficas de velocidad de pérdida de masa y temperaturas experimentadas por los tres hormigones objeto de estudio para los flujos de calor de 35 kW/m^2 y 75 kW/m^2 durante el ensayo de 60 minutos de duración. Tal como se aprecia en las figuras, el hormigón P, que presentaba el menor contenido de humedad, fue el que mayor aumento de temperatura experimentó durante los ensayos.

La Fig. (7) muestra las gráficas de la pérdida de masa acumulada experimentadas por los tres hormigones para los flujos de 35 kW/m^2 y 75 kW/m^2 durante el ensayo de 60 minutos de duración. Tal como se observa en la figura, el hormigón que mayor pérdida de masa experimentó a los dos flujos de ensayos fue el hormigón P.

En la Fig. (8) se presenta una comparativa de la velocidad de pérdida de masa experimentada por los tres

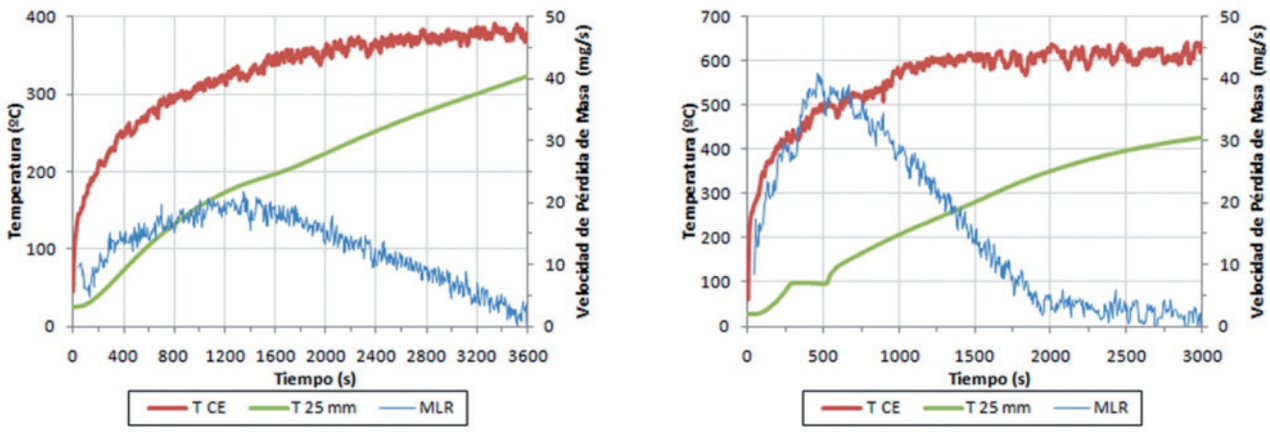

Fig. 6: Velocidad de pérdida de masa y temperaturas experimentadas por el hormigón P durante los ensayos a flujos de calor de 35 kW/m2 (izquierda) y 75 kW/m2 (derecha)

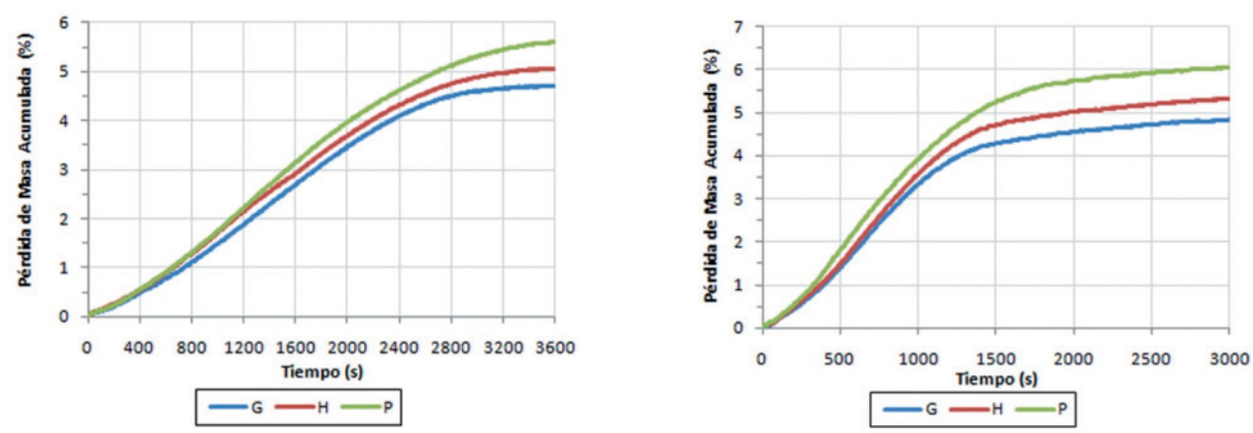

Fig. 7: Pérdida de masa acumulada experimentadas por los hormigones durante los ensayos a flujos de calor de 35 kW/m2 (izquierda) y 75 kW/m2 (derecha)

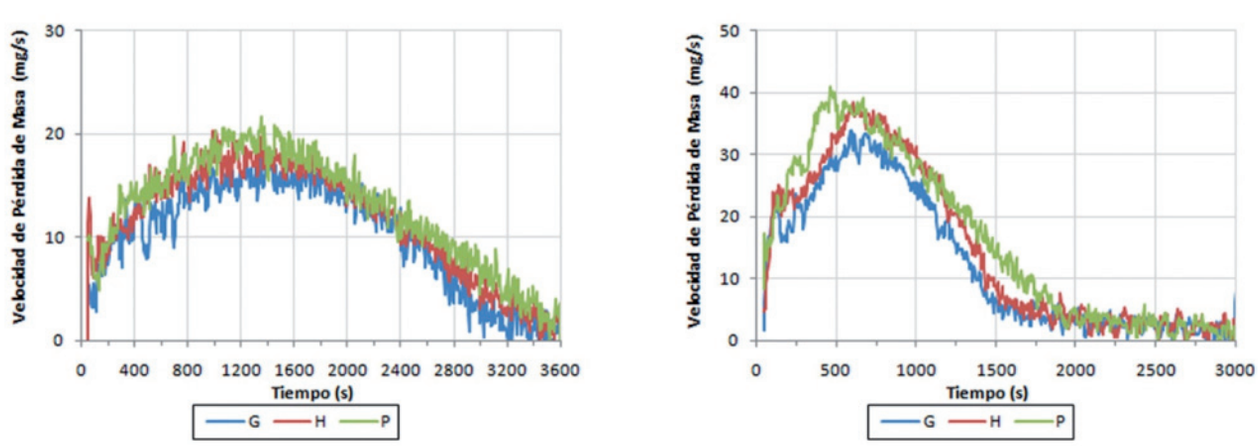

Fig. 8: Comparación de las velocidades de pérdida de masa experimentadas por los hormigones durante los ensayos a flujos de calor de 35 kW/m2 (izquierda) y 75 kW/m2 (derecha)

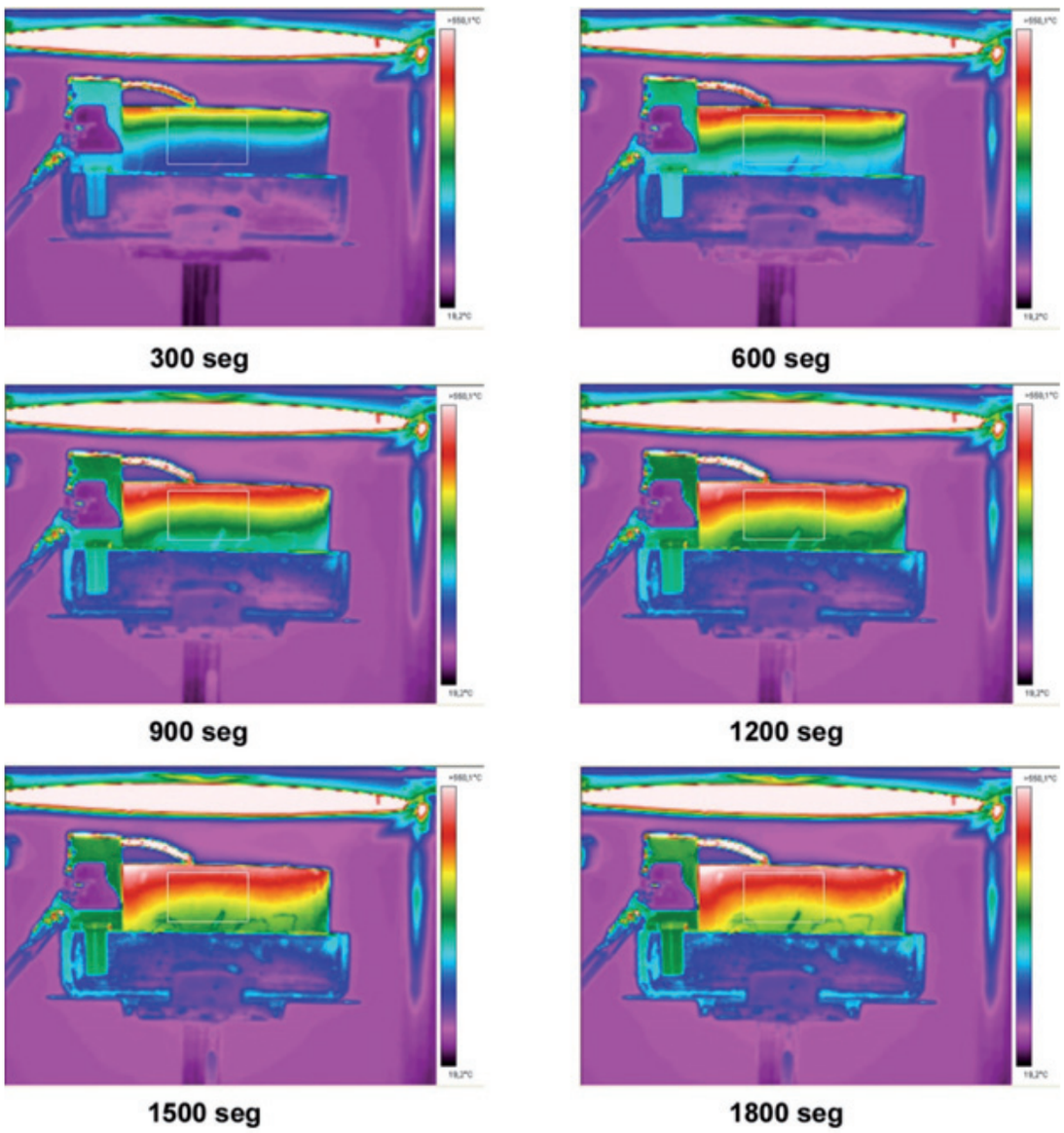

Fig. 9: Perfil de Temperaturas observados mediante termografía infrarroja en una de las muestras del hormigón P en el ensayo para un flujo de calor de 75 kW/m2 y 30 minutos de duración

hormigones objeto de estudio para los dos flujos analizados durante el ensayo de 60 minutos. Tal como se aprecia en las figuras, las velocidades máximas de pérdida de masa que se experimentaron durante los ensayos al flujo de calor de 75 kW/m^2 fueron entre un 60 % y un 70 % superiores en relación a los ensayos al flujo de calor de 35 kW/m^2.

La Fig. (9) presenta la progresión del ataque térmico y la temperatura a 25 mm de la cara expuesta en una de las muestras del hormigón G en el ensayo de flujo de calor de 75 kW/m^2 y 30 minutos de duración. Tal como se aprecia en la Tabla 3, la correlación entre los valores de temperatura obtenidos mediante termografía y los obtenidos de las lecturas del termopar presentan un *coeficiente de correlación Pearson* (R^2) muy elevado de 0.9912.

Tiempo	Temp. 25 mm TP	Temp. 25 mm CT
300	98.0	124.3
600	137.6	170.7
900	193.3	206.8
1200	247.0	238.5
1500	294.4	291.8
1800	337.5	338.6
Coef. Corr.	**0.9912**	

Tabla 3: Correlación entre las temperaturas reportadas por el termopar y las observadas con la cámara termográfica

En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados obtenidos para las muestras analizadas.

Código	A	B	C	D	E	F	G
G-35-30	793.6	767.6	26.0	370.0	214.6	26	-
H-35-30	786.3	759.8	27.5	367.5	217.2	27	-
P-35-30	762.2	732.5	29.7	380.9	221.4	28	-
G-35-60	776.4	739.9	36.5	382.9	288.9	25	-
H-35-60	794.5	762.1	32.4	360.0	319.3	26	-
P-35-60	817.1	771.3	45.8	385.7	322.9	28	-
G-75-30	775.0 732.6		42.4	553.5	317.6	38	-
H-75-30	779.6	741.4	38.2	551.5	366.5	42	-
P-75-30	782.4	742.0	40.4	575.7	337.5	60	x
G-75-60	765.7	723.0	42.7	637.9	427.8	37	-
H-75-60	817.7	774.2	43.5	611.9	411.4	40	-
P-75-60	797.1	749.4	47.7	642.4	422.5	45	-
A: Masa Inicial (g) B: Masa Final (g) C: Pérdida de Masa (g) D: Temperatura Máxima Cara Expuesta (°C) E: Temperatura Máxima Centro de la Muestra (°C) F: Velocidad Máxima de Pérdida de Masa (mg/s) G: Ocurrencia de Spalling							

Tabla 4: Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos.

3. DISCUSIÓN

Tal como se aprecia en los resultados presentados de la Tabla 4, las temperaturas dentro de las muestras de hormigón se vieron influenciadas por el contenido de humedad. A medida que se incrementa el contenido de humedad se produce una disminución en las temperaturas reportadas por los termopares durante el ensayo. Este fenómeno evidencia el efecto de enfriamiento que produce la evaporación del agua dentro del hormigón, lo cual retarda el incremento de las temperaturas.

La velocidad máxima de pérdida de masa presentó una dependencia directa con la cantidad de agua de amasado. A mayor cantidad de agua de amasado mayor fue la velocidad de pérdida de masa experimentada por las muestras durante los ensayos.

El instante de tiempo en el que se produce la máxima velocidad de pérdida de masa también es dependiente del contenido de humedad. Los resultados para los ensayos de 35 kW/m^2 muestran que a menor contenido de humedad inicial, mayor es el tiempo necesario para alcanzar la velocidad máxima de pérdida de masa.

Para el caso de exposición a un flujo de 75 kW/m^2, se observó que los mayores valores de velocidad de pérdida de masa se registraron en aquellos hormigones con mayor contenido inicial de humedad. Para esta condición, los resultados muestran que a medida que se incrementa el contenido de humedad de las muestras disminuye el tiempo en el cual se alcanza esta velocidad máxima.

Estos resultados recalcan el hecho de la gran influencia que ejerce la condición de ataque térmico y el contenido de humedad inicial sobre los mecanismos de liberación de la humedad en el hormigón.

Una de las muestras del hormigón P presentó *spalling* explosivo de superficie en el ensayo de 75 kW/m^2 y 30 minutos de duración, sin embargo este fenómeno no se repitió en ninguna otra muestra de este hormigón ensayadas a 30 o 60 minutos. Cabe destacar que los experimentos han sido diseñados para evaluar la adecuación de la metodología experimental para evaluar los fenómenos de transferencia de masa y energía y no para reproducir *spalling*.

De los resultados obtenidos de los ensayos se puede inferir la siguiente tendencia:

- El contenido de humedad inicial de la muestra influye en la velocidad con que se alcanzan los 100 ºC a 25 mm de la cara expuesta. A mayor contenido de humedad, mayor tiempo, debido a que parte de la energía calorífica suministrada a la muestra se consume en el proceso de evaporación del agua.

- Según se ha podido constatar, la velocidad máxima de pérdida de masa está influenciada por la magnitud del

ataque térmico sobre la probeta. Los valores máximos de velocidad de pérdida de masa se producen para el flujo de 75 kW/m^2, los cuales son entre un 60 y un 70 % superiores que los observados para el flujo de 35 kW/m^2.

- Para las mismas condiciones de exposición térmica, a medida que la cantidad de agua utilizada durante el amasado es menor, menor resulta la velocidad máxima de pérdida de masa.

- A medida que aumenta la cantidad de agua utilizada durante el amasado, aumenta el tiempo para que se produzca la expulsión del agua libre del hormigón. No obstante, se sugiere el desarrollo de ensayos de porosidad y de permeabilidad al vapor para poder describir de manera más aceptada el comportamiento de este parámetro.

- Las temperaturas alcanzadas en la cara expuesta de las muestras sometidas al flujo de 75 kw/m^2 son lo suficientemente elevadas para provocar la deshidratación de la pasta de cemento y la descomposición del hidróxido de calcio.

- Los tres hormigones reportaron un plateau de evaporación a 100 ºC por el termopar ubicado a 25 mm de la cara expuesta. Durante el tiempo en que se mantuvo esta condición se observó la salida de agua líquida y burbujas de gas por las inmediaciones del termopar.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado una metodología experimental para evaluar los fenómenos de transferencia de masa y energía en hormigones sometidos a elevadas temperaturas, que ha permitido determinar con precisión tanto la pérdida de masa experimentada por las muestras como la evolución de las temperaturas en su interior.

Los resultados de los ensayos sobre los tres hormigones estudiados han demostrado que la metodología experimental propuesta es sensible a la variación de los parámetros considerados en el estudio, destacando el papel determinante que ejerce la velocidad y la intensidad de la agresión térmica en el comportamiento del hormigón.

Se ha evidenciado que el contenido de humedad inicial ejerce influencia tanto en el incremento de las temperaturas como en la velocidad máxima de pérdida de masa y el tiempo necesario para la expulsión de la humedad del hormigón.

Los resultados del análisis de pérdida de masa al flujo de calor de 75 kW/m^2 mostraron que es posible asociar la pérdida de masa que se produce a partir de la estabilización de la velocidad de pérdida de masa entorno a los 2000 segundos con la deshidratación del silicato de calcio hidratado. Sin embargo, en la rama ascendente de la curva se está produciendo de forma combinada la expulsión del agua libre y la expulsión del agua de deshidratación, lo cual dificulta el análisis del proceso. En ese sentido, se recomienda realizar también ensayos sobre muestras secadas previamente a 105ºC a fin de poder aislar estos fenómenos.

La porosidad y la permeabilidad del hormigón se encuentran estrechamente relacionadas con la cantidad de agua utilizada durante el amasado y con el contenido de humedad. En ese sentido, los resultados obtenidos en los análisis para ambas condiciones de ataque térmico de los hormigones G y H, los cuales difieren básicamente en la relación agua-cemento, ponen de manifiesto la relación directa que existe entre la permeabilidad y la porosidad y la velocidad de pérdida de masa, siendo mayor esta última para el hormigón H, el cual presenta la relación agua-cemento más alta.

La utilización de la termografía infrarroja para monitorizar la penetración de la onda térmica en el hormigón ha demostrado ser un método bastante fiable para estimar las temperaturas en las muestras. En ese sentido, el análisis de correlación de las lecturas mediante termografía y los termopares ha sido positivo, por lo que esta técnica puede aplicarse para estimar las temperaturas en zonas en las que no se han colocado termopares.

Se ha comprobado que el tamaño de muestras empleado es lo suficientemente grande para evaluar la salida de agua desde el interior de la muestra a diferencia de los análisis termogravimétricos convencionales, los cuales requieren volúmenes muy pequeños de material en polvo para el desarrollo de los experimentos.

La metodología propuesta ha demostrado ser adecuada para describir el proceso de transferencia de masa y energía que tiene lugar en el interior del hormigón producto del ataque térmico. En ese sentido, es posible aplicar el método propuesto para evaluar diversos tipos de fenómenos, tales como la efectividad de las fibras de polipropileno para la liberación de humedad y la reducción de la presión de poros, etc. En este sentido, como líneas de continuidad de los trabajos se señala el establecer las relaciones que existen entre la permeabilidad, la porosidad y la pérdida de masa.

5. AGRADECIMENTOS

El presente Estudio ha sido desarrollado al amparo del Convenio de Colaboración entre el Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones IECA y el Grupo GIDAI de la Universidad de Cantabria para el “Análisis del Comportamiento al Fuego de Hormigones de Alta Resistencia Reforzados con Fibras”.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Msaad Y. "Comparison between Hydraulic and Thermal Spalling in Heated Concrete Based on Numerical Modeling", *Journal of Engineering Mechanics.* June 2007. Vol. 133-6, P. 608-615.
- Zeiml M, Lackner R. "Experimental Investigation on Spalling Mechanisms in Heated Concrete", En: *Proceeding 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FramCos-6).* (Catania 2007), P. 1723-1728.
- Jansson R, "Material properties related to fire spalling of concrete", Licentiate Thesis, Lund University of Technology, 2008.
- Harmathy TZ. "Effect of moisture on the fire endurance of building elements". *ASTM Special Technical Publication 385. January 1965. P.74-95.*
- Kalifa P, Chéné G, Gallé C. "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure". *Cement and Concrete Research.* October 2001. Vol. 31-10. P.1487-1499.
- Lottman BBG. "Fire in bored tunnels. Structural behaviour, during fire conditions, of bored tunnels made with a concrete segmental lining". Master Thesis. Delft University of Technology, 2007.
- Bazant ZP, Kaplan MF. *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models.* 1 edition. Longman, 1996. 424p. ISBN 978-0582086265.
- *Fib Bulletin.* International Federation for Structural Concrete. 2007, vol 38. Fire design of concrete structures – material, structures and modeling: International Federation for Structural Concrete, 2007. ISBN 978-2-88394-078-9.
- Ye G, Liu X, De Schutter G, et al. «Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature». *Cement and Concrete Research.* June 2007. Vol.37-6. p.978-987.
- Diederichs U, Jumppannen U M, Pentalla V. "Behaviour of high strength concrete at high temperature". Report 92. Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, 1992.
- Jansson R, Bostrom L. "Experimental study on the influence of polypropylene fibres on material properties and fire spalling of concrete". From: fib Task Group 4.3 Workshop "Fire design of concrete structures - from materials modelling to structural performance". Coimbra, Portugal, 2007.
- Mindeguia JC, Pimienta P, Noumowé A, et al. "Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk". *Cement and Concrete Research.* March 2010. Vol. 40-3. p.477–487.
- Crespo-Alvarez J, Capote-Abreu JA, Alvear-Portilla MD. "Analysis of the Moisture Resease Mechanisms of Concrete at Elevated Temperatures". En: *Proceeding of 37th IAHS World Congress on Housing "Design, Technology, Refurbishment, and Management of Buildings"*, (Santander 26-29 October 2010), XXXVII IAHS World Congress. Topic IX: Paper 936, ISBN: 978-84-693-6657-8, 2010.
- Sarvaranta L, Mikkola E. "Fibre Mortar Composites in Fire Conditions". *Fire and Materials.* January/February 1994. Vol. 18-1. P.45–50.
- ASTM. Measurement of Mass Loss and Ignitability for Screening Purposes Using a Conical Radiant Heater. ASTM E 2102-04a. American Society for Testing and Materials, 2004.
- ISO. Reaction-to-fire tests -- Heat release, smoke production and mass loss rate -- Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). ISO 5660-1:2002. International Organization for Standardization, 2002.