Revista ALCONPAT, Volumen 3, Número 1, Enero - Abril 2013, Páginas 1 - 16

Revista ALCONPAT

www.revistaalconpat.org

eISSN 2007-6835

Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Determinación de la profundidad de daño en estructuras de hormigón post-incendio

M.C. Alonso[1], V. Flor Laguna[1]

[1]Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), Serrano Galvache 4, 28033, Madrid, España.

Información del artículo
DOI:
http://dx.doi.org/10.21041/ra.v3i1.39
Artículo recibido el 21 de Septiembre de 2012 y revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 01 de Noviembre de 2012. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el tercer número del año 2013 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2013

© 2013 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 3, No. 1, Enero – Abril 2013, 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, fecha de publicación: 30 de enero de 2013.

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.

RESUMEN

La evaluación de las estructuras de hormigón afectadas por fuego debe permitir la comprensión de lo que ocurrió durante el incendio y el desarrollo de criterios racionales para la posterior evaluación de la seguridad de la estructura, con el fin de poder decidir sobre su futura reparación o demolición. En el presente trabajo se ha identificado la heterogeneidad en la distribución de los daños y se ha determinado la profundidad del hormigón afectado por el fuego en tres tipologías de estructuras afectadas por incendios de diferente intensidad. El estudio ha permitido determinar el gradiente de temperaturas alcanzado en el hormigón. También se ha determinado la profundidad máxima de hormigón que alcanza la temperatura crítica de 500 ºC. Por último, se propone un protocolo para la evaluación de daños en las estructuras de hormigón afectadas por el fuego incluyendo métodos no destructivos y destructivos y un análisis de daño a nivel micro y macro de la estructura.
Palabras Clave: fuego; hormigón; diagnosis; NDT y DT; daño; cambios micro y macro-estructurales.

ABSTRACT

The assessment of concrete structures exposed to a fire event must allow understanding what happened during the fire and the development of rational criteria for further evaluation of the safety of the structure in order to decide on the future repair or demolition of the structure.
In this work, three types of structures affected by fires of different intensity have been studied. The heterogeneity in the distribution of the damage has been identified and determined the depth of concrete affected. The study allows proposing the temperature gradient achieved in the concrete. It has also been determined the maximum depth of concrete that reached the critical temperature of 500 °C. Finally, a protocol for the evaluation of concrete structures affected by fire including non-destructive and destructive methods and analysis of damage at the micro and macro structure is been proposed.
Keywords: fire; concrete; assessment; NDT and DT; damage; micro and macro changes.

Autor de contacto: Mª Cruz Alonso (mcalonso@ietcc.csic.es)

1. INTRODUCCIÓN

Muchas estructuras de hormigón están expuestas a riesgo de incendio a lo largo de su vida en servicio, por lo que la mayor parte de los códigos de construcción internacionales contemplan y regulan los requisitos mínimos a cumplir para garantizar la seguridad estructural durante el incendio y por tanto la seguridad de las personas.

El hormigón armado se considera un material que muestra una resistencia aceptable a altas temperaturas, en comparación con otros materiales de construcción, como acero, polímeros o madera, lo que permite emplear los elementos de hormigón sin necesidad de utilizar protección adicional. Sin embargo, la exposición a altas temperaturas durante períodos suficientemente prolongados puede inducir alteraciones físico-químicas en sus materiales componentes, acompañadas de cambios en las propiedades mecánicas que llevan a pérdida en la seguridad de la estructura (Piasta et al, 1984; Alonso y Fernández-Municio, 2004, 2005 y 2008-1).

Una vez concluido el incendio la reparación de las estructuras afectadas es un capítulo abierto que conduce a la necesidad de tener que identificar la profundidad del daño causado por el incendio, tanto a nivel de los materiales como de los elementos estructurales y de la propia estructura. En la evaluación del deterioro de las estructuras de hormigón después del fuego es preciso identificar el nivel de daño inducido por los procesos químicos y físicos que tienen lugar en todos los componentes, tanto a las altas temperaturas generadas durante el incendio como durante el enfriamiento y que contribuyen a la pérdida de las resistencias mecánicas (Tay y Tam, 1996; Khoury 1992; Chan et al, 2000). La capacidad residual debe ser identificada con suficiente precisión cuando la seguridad de la estructura está en riesgo, con el fin de definir la estrategia de la reparación más adecuada o decidir sobre la demolición de la estructura.

La baja difusividad térmica del hormigón garantiza una propagación lenta de las transformaciones químicas de los componentes de hormigón, tanto en la pasta de cemento hidratada como en los áridos, que necesitan tiempo para desarrollar plenamente las conversiones que tienen lugar a distintas temperaturas específicas. Debido a estas razones y junto con los fuertes gradientes térmicos que aparecen se inducen tensiones mecánicas en la masa de hormigón, que favorecen el desarrollo de fisuras, tanto durante el calentamiento como en el enfriamiento, (Chan et al, 2000, Bamonte et al, 2011). Además de los fuertes gradientes de temperatura, tiene lugar la deshidratación de la pasta de cemento que se produce con la evolución de vapor de agua, lo que genera tensiones elevadas dentro de los poros, por lo que el riesgo de explosión o desprendimiento de las capas exteriores de hormigón es alto, dejando nuevas superficies de hormigón expuestas directamente a las altas temperaturas exteriores del incendio, (Bazant y Kaplan, 1996).

Las transformaciones físico-químicas que se producen en los componentes del hormigón a alta temperatura, son bien conocidas y fácilmente identificables cuando la caracterización se realiza en el laboratorio, en muestras de hormigón que han alcanzado el estado de equilibrio a cada temperatura, existiendo una correlación con la pérdida de propiedades mecánicas en el hormigón (Rostasy et al, 1987). Sin embargo es más difícil de garantizar una buena correlación en escenarios de incendio reales o utilizando las curvas de tiempo equivalente de los códigos y el grado de daño sobre los componentes del hormigón y sobre la armadura, ya que se produce un gradiente de deterioro (Schneider, 1990). Aún es más complicado identificar el nivel de daño cuando el fuego tiene lugar en una estructura real, ya que son muchos los factores que están contribuyendo al daño y no existe ninguna relación clara entre la temperatura máxima en superficie y la resistencia residual de hormigón o capacidad portante residual de la estructura.

En las investigaciones in-situ de una estructura expuesta al fuego es crítica la identificación del nivel de perdida de resistencia mecánica del hormigón a través de la evaluación de los cambios en

sus propiedades teniendo en cuenta las variaciones entre el hormigón exterior dañado y el interior sano no afectado por el incendio (Alonso,2008-2).

La evaluación de la capacidad residual de estructuras de hormigón expuestas al fuego es una tarea bastante compleja, debido principalmente a la heterogeneidad del hormigón, pero también se asocia con la distribución irregular de los daños inducidos por el fuego, por lo que la evaluación se debe extender en amplias áreas de la estructura, visiblemente afectadas y no afectadas (Stawiski, 2006). Un enfoque posible es encontrar una respuesta media de la capa de hormigón deteriorada empleando simultáneamente técnicas de tipo destructivo (DT) y no destructivo (NDT), con el fin de interpretar la respuesta media del recubrimiento de hormigón. (Felicetti, 2004-1) propone una aproximación al problema obteniendo información durante la inspección bien mediante análisis en pequeñas muestras tomadas de la estructura a diferentes profundidades o emplear técnicas especiales para ver la respuesta global del elemento de hormigón después del incendio.

En una evaluación in-situ se suelen emplear técnicas NDT para diferenciar entre zonas de la estructura afectadas y dañadas por el incendio y las no dañadas, entre ellas destacan, el martillo Hammer o la velocidad de ultrasonidos, (Benedeti, 1998; Benedetti y Mangoni, 2004; Felicetti, 2004-1; Calavera et al, 2005; Colombo y Felicetti, 2006, Alonso, 2008-2), o semicuantitativas, como la resistencia a la penetración con taladro (Colombo y Felicetti, 2006). Sin embargo, es importante identificar la penetración del daño y la diferenciación entre el tipo de daño, es decir si es de origen químico, físico o mecánico para determinar las consecuencias de los gradientes por tensiones térmicas. Para completar la evaluación se suele recurrir al uso de testigos de hormigón y del armado con el fin de ser ensayados en el laboratorio, para determinar las resistencias mecánicas residuales, análisis petrográfico de los áridos (Ingham, 2009) y análisis de alteración térmica de la pasta de cemento y pérdida de ductilidad del acero. También la adherencia entre los aceros y el hormigón se ve afectada por las tensiones térmicas de la interface (Huang, 2010)

Entre los métodos más habitualmente empleados en laboratorio para determinar las transformaciones de tipo químico se encuentran la termografía de infrarrojo y las cámaras digitales colorimétricas (Felicetti, 2004-2; Colombo y Felicetti, 2006, Short y Purkiss, 2004; Zhang et al, 2002). Para las transformaciones químicas de la pasta de cemento se suelen emplear técnicas de caracterización de materiales como análisis térmico diferencial junto con termogravimetria (ATD/TG) y difracción de rayos X, con el fin de identificar la alteración de los componentes de la pasta de cemento hidratada y los áridos, que está relacionada con la caída de resistencias mecánicas (Alonso, 2006-1-2; Alonso, 2008). También, se han hecho intentos de evaluar la fisuración del hormigón usando secciones delgadas para análisis petrográfico y microscopía electrónica, SEM (Tay y Tam, 1996; Rilley, 1991; Piasta, Sawicz et al, 1984; Cioni et al, 2001; Alonso, 2006-1y 2008-2; Ingham, 2009). En (Alonso (2006-1) se han utilizado indicadores de daño para evaluar estructuras de hormigón armado afectadas por el fuego y se ha dado un protocolo para identificar el nivel de daño en el hormigón.

Sin embargo, el uso aislado de cualquiera de los métodos mencionados no da resultados fiables a causa del gradiente y a la no homogeneidad de los daños que causan las diferencias entre la respuesta externa e interna del hormigón (Stawiski, 2006). Además, la evaluación post-incendio de estructuras de hormigón armado es compleja debido a la superposición de los fenómenos químicos y físicos que inducen diferentes tipos de daños (Alonso, 2006-1-2).

En este trabajo se contempla la evaluación de los daños producidos en el hormigón y en el acero de varias tipologías de estructuras de hormigón que han sufrido diferentes escenarios de incendio (intensidad y duración): 1) estructura de edificación subterránea, 2) edificio de oficinas y 3) Túnel de transporte por carretera. Se han compaginado ensayos de inspección in-situ y ensayos de laboratorio. Se busca proponer un protocolo para la evaluación de las estructuras de hormigón afectadas por el fuego incluyendo métodos no destructivos y destructivos y un análisis de daño a

nivel micro y macro de la estructura para determinar la profundidad máxima de daño irreversible en los materiales con pérdida de sus propiedades críticas.
El fin último de identificar la extensión y profundidad del daño en el hormigón y en el armado es poder aportar datos fiables de entrada de gradientes de temperatura que han tenido lugar en la estructura para aplicar en la evaluación de la capacidad residual de la estructura y la modelización macroscópica de la resistencia de la estructura durante el incendio, como se refleja en (Kodur, 2009), aspectos estos que no se desarrollan dentro del alcance del presente trabajo.

2. DESCRIPCION DE LAS ESTRUCTURAS

Se han considerado tres tipologías de estructuras que han estado expuestas a situaciones de incendio de diferente duración e intensidad. Las características más relevantes de estas estructuras se describen a continuación

1) Se trata de un edificio subterráneo de tres sótanos que almacenaba una central de transformación eléctrica para la distribución de electricidad. El techo del sótano primero fue construido con vigas pretensadas. Entre el segundo y el tercer sótano se localizaba una losa de hormigón armado de 1 m de espesor. Cada piso estaba constituido por pilares con diferentes dimensiones, 250x30x35cm y 250x30x50cm, espaciados cada 4-5 m. Completaba la estructura unas vigas de hormigón armado de 35x30x600cm. El fuego se inició en el primer sótano y llegó a los sótanos segundo y tercero. Los transformadores rellenos de aceite llevaron a convertirse en una elevada carga de fuego que junto con la tipología de estructura hizo que fuera imposible el acceso y la duración del fuego activo en el sótano tercero se extendió hasta 48 horas.
2) La Torre Windsor de Madrid era un edificio que albergaba básicamente oficinas, de más de 100 m de altura con 37 plantas. La estructura típica de la torre estaba configurada entorno a un núcleo formado por pantallas de hormigón, con columnas de 50x220 y de 50x180cm, que alojaban los ascensores y escaleras, (Calavera et al, 2005; Fletcher et al, 2006). Fuera del núcleo se disponían pórticos de pilares que se macizaban conformando vigas de gran canto. Los bordes de cada planta se cerraban con columnas perimetrales de acero. El edificio estuvo involucrado en un incendio que se inició en el piso 21, pero que llegó a afectar prácticamente a todo el edificio por encima de la 4ª planta, la duración total del incendio fue de 18 horas.
3) La estructura del túnel tenía una altura y ancho de 4,55 m por 10,5 m. Fue construido con hormigón HA-25 en masa de 30cm de espesor sin refuerzo. Constaba de un techo de hormigón armado de HA-35 de 18 cm con una cámara de ventilación. La superficie del hormigón estaba recubierta con una pintura no reflectante. El fuego se inició debido a la combustión de la cabina de un camión, y duró unos 20-30 minutos.

3. EVALUACION DE TECNICAS EN INSPECCION IN-SITU POST-INCENDIO. USO DE NDT

La tipología de estructuras así como la duración del incendio llevó a diferentes niveles de daño en cada una de ellas que se describen a continuación.

3.1 Análisis de la inspección in-situ visual

La inspección visual se utilizó para evaluar el daño aparente, por ejemplo, la distribución de las zonas de hormigón que habían sufrido explosión, como las que se muestran en la Figura 1, en vigas y losa del edificio subterráneo, en forjados de edificio de oficinas y en el túnel.

Un aspecto a clarificar en la inspección es identificar en qué momento se han desarrollado las distintas explosiones o desprendimientos del recubrimiento de hormigón, si se producen durante el incendio y por tanto a alta temperatura, o durante el enfriamiento debido a los gradientes térmicos y pérdidas de propiedades en el hormigón que facilitan su saltado.

También las esquinas de los pilares y vigas son puntos críticos de explosión, como se muestra en la Figura 2, una de las causas a las que se atribuye este deterioro es que el fuego afecta por dos caras simultáneamente, llegando a producirse tensiones asimétricas, como propone (Jau, 2008), que junto a los procesos de degradación química llevan al fallo del hormigón.

a) Explosiones en vigas pretensadas y en losa de hormigón (edf. sótano)

b) Daños en forjado (edf. oficinas)

c) Explosiones superficiales de hormigón (túnel).

Figura 1. Daños en elementos de hormigón después del incendio.

Aunque esta no es una tarea fácil de deducir de una simple observación visual, algunos aspectos en el hormigón pueden orientar, como el cambio de color de la pasta de cemento de los áridos, así el color amarillento en la pasta y marrón rojizo en los áridos silíceos del edificio de oficinas sugirieron una temperatura en la superficie superior a los 800 ºC. Además, si la explosión tiene lugar durante el incendio y deja la armadura expuesta, si esta se encuentra completamente cubierta con una capa de óxido de color marrón-rojizo o negro, es típico de corrosión inducida a alta temperatura, > 500 º C.

Los elementos de hormigón pretensado, son muy sensibles a los gradientes de temperatura generados durante un incendio y pueden verse sometidos a explosiones que llegan a destruir parcial o totalmente el hormigón e incluso romper los cables pretensados. La explosión se podría desarrollar en varias etapas: una primera fase que lleva al saltado del recubrimiento de hormigón debido a los gradientes térmicos y pérdida del confinamiento comprimido del hormigón que dejaría los cables expuestos directamente el fuego, aumento brusco de la temperatura en el alambre, y rotura de cables debido a la pérdida de ductilidad del acero expuesto a alta temperatura, como se muestra en la Figura 2, indica que la temperatura a nivel de la armadura ha alcanzado valores superiores a 500 º C.

(a)

(b)

Figura 2. a) Armadura expuesta en esquina en viga. b) Explosión en vigueta pretensada y acero expuesto tras saltado del recubrimiento.

La profundidad de carbonatación en el hormigón también es un parámetro a determinar in-situ en diferentes puntos de la estructura y en el interior, para ello se puede emplear el indicador de fenolftaleína, a fin de no malinterpretar con la transformación de portlandita inducida por el fuego, como se comentará más adelante, (Alonso, 2006-1-2)

3.2 Ensayos in-situ no destructivos

El método NDT más utilizado para valorar la extensión del daño de estructuras de hormigón después del incendio es la velocidad de ultrasonidos (Felicetti, 2008). Los ensayos in-situ empleando la técnica se aplicó a la inspección de pilares de hormigón de la estructura sótano. Los resultados indicaron heterogeneidades en el daño para un mismo pilar, tal como se muestra en la Figura 3, y entre pilares. La velocidad de ultrasonidos varía con una serie de factores: a) la altura del pilar, indicativo de la distribución heterogénea de los daños y de la carga térmica, también observado por (Stawiski, 2006), b) la presencia de fisuras y grietas y c) la distancia a las fisuras e intensidad de fisuración. Estas medidas ponen en evidencia que las variaciones bruscas en la intensidad de fisuración se corresponden con bajas velocidades de ultrasonido. Sin embargo, no se puede deducir directamente a partir de estas medidas que la penetración de los daños y la profundidad de alteración del hormigón haya dado lugar a la alteración química e irreversible de los componentes del hormigón debido al incendio, para ello es preciso recurrir a otro tipo de ensayos.

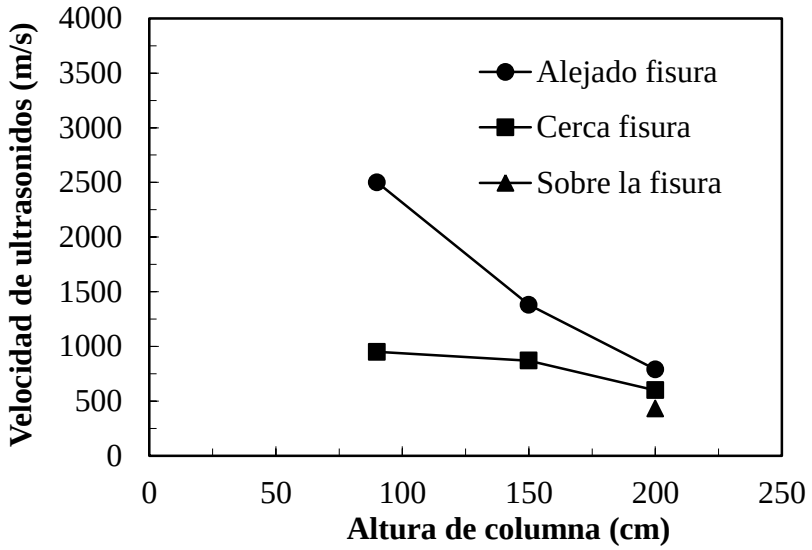


Figura 3. Velocidad de ultrasonidos en pilares dañados por el fuego, edificio sótano. Influencia de la presencia de fisuras y altura del pilar.

4. EVALUACION DE LA PROFUNDIDAD DEL DETERIORO MEDIANTE ENSAYOS DT

Los estudios en laboratorio son de tipo DT ya que todos se realizan sobre porciones de testigos de hormigón o fragmentos de armadura extraídos de la estructura que deben contribuir a identificar de forma precisa el nivel de degradación del hormigón y del acero con la temperatura. Las zonas seleccionadas para la extracción de testigos se han definido a partir de los estudios in-situ visuales y con NDT. La extracción de un testigo completo ha sido prácticamente imposible y bastante complicado, debido al gradiente de daño, a la alteración química de los componentes y a la presencia de fisuración en el interior del hormigón que han llevado a la fragmentación del testigo. La observación del hueco dejado por el testigo ha ayudado a identificar la propagación de fisuras internas no visibles en la evaluación in-situ, lo que ha permitido explicar la caída de velocidad observada con las medidas de ultrasonidos descritas en la Figura 3.
Las muestras de armadura, activa o pasiva, se obtuvieron para determinar la pérdida de propiedades mecánicas y la existencia de fragilización inducida por la temperatura.
El estudio sobre testigos de hormigón debería ayudar a determinar la caída de propiedades químicas y mecánicas y a identificar la profundidad de penetración de temperatura crítica que ha inducido cambios químicos irreversibles en los componentes de hormigón.

4.1 Identificación de la pérdida de propiedades mecánicas en el hormigón

La determinación de las pérdidas mecánicas debidas a la acción del fuego es una tarea complicada, ya que el daño no se distribuye homogéneamente puesto que se ha producido alteración química del hormigón en gradientes de diferente intensidad dentro del propio testigo. Aunque no sea posible obtener un testigo completo con la zona externa, la más afectada, sin embargo la parte interior puede resultar intacta y es la única utilizable para la determinación de la resistencia mecánica del hormigón menos alterado por la acción de las elevadas temperaturas durante el incendio. Algunos autores proponen como ensayo alternativo el uso de testigos con menor esbeltez o varias lonchas de un determinado espesor obtenidas del testigo a distinta profundidad que someten a un proceso de rotura por carga local aplicada por punzonamiento para evaluar la profundidad de pérdida de

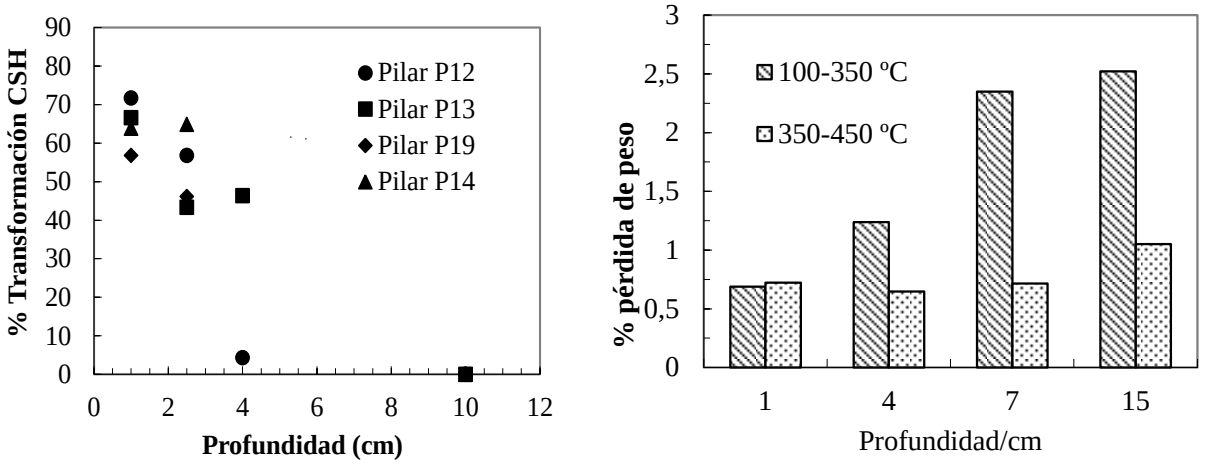
prestaciones mecánicas (Benedetti y Mangoli, 2004), aunque en el presente estudio no se recurrió a estos métodos. Como no fue posible obtener datos de resistencias mecánicas directas, la pérdida de propiedades irreversibles en el recubrimiento de hormigón se ha realizado a partir de determinar la profundidad del alteración físico-química de los materiales, siguiendo la metodología y técnicas descritas a continuación

4.2 Métodos para determinar las transformaciones químicas en la pasta de cemento y áridos

El gel CSH de la pasta de cemento hidratado es el principal componente responsable de la pérdida de resistencias mecánicas (Alonso y Fernández-Municio, 2008-1). La deshidratación del CSH se ha identificado en el presente trabajo mediante ensayos de análisis térmico, ATD/TG, a partir de la pérdida de peso entre 100 y 350ºC. La detección de deshidratación del gel CSH permite identificar la profundidad de hormigón que ha estado expuesto a temperaturas en torno a 350 º C, como se muestra en la Figura 4a, en el caso de los pilares del edificio de oficinas en diferentes plantas, en los que fue posible identificar a partir de ATD/TG que la profundidad máxima de alteración asociada a deshidratación del gel CSH de la pasta llegó hasta 3 cm, mientras que en la estructura subterránea la alteración en la pasta de cemento llegó hasta 7cm (Alonso, 2006-1-2).

También es común emplear esta técnica para identificar la presencia de portlandita cuya descomposición tiene lugar entre 450-500ºC pero es necesario asegurar el origen de la misma, si no está afectada por el fuego o resulta de un proceso de neo-formación tras el incendio durante el enfriamiento (Alonso, 2006-1; Alarcon-Ruiz et al, 2005).

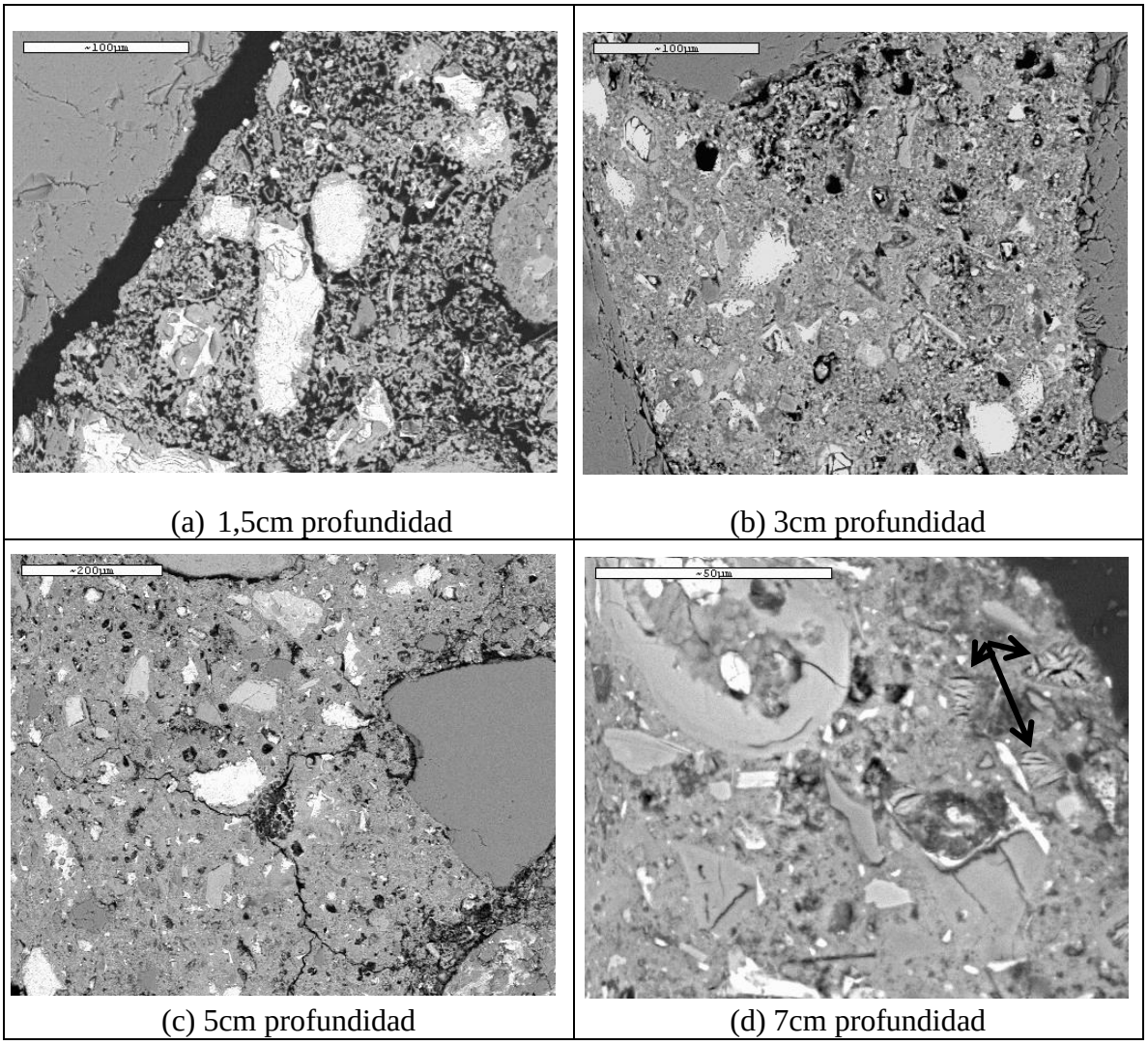
Es importante en este punto tener en cuenta que la deshidratación del gel CSH no puede ocurrir a temperatura ambiente, mientras que la portlandita a temperatura ambiente sufre también un proceso de transformación debido a la carbonatación por su interacción con el CO_2 del ambiente, (Alonso, 2006-1-2) que puede falsear las medidas y llevar a imprecisiones en la determinación de la profundidad de deterioro del hormigón realmente afectado por el incendio, como es el caso reflejado de la Figura 4b En el que se puede apreciar como una inadecuada interpretación de este dato puede llevar a sobredimensionar la profundidad del daño, alteración química del hormigón causada por el incendio.



(a) (b)

Figura 4. Profundidad de la alteración de la pasta en testigos de hormigón a varias profundidades en pilares de varias plantas, edificio de oficinas (a), edificio sótano (b).

La microscopia SEM se ha empleado con el fin de identificar el origen y la tipología del daño, si es por alteración de la pasta y áridos (tipo químico) o físico por fisuración a causa de las tensiones térmicas internas.



(a) 1,5cm profundidad (b) 3cm profundidad

(c) 5cm profundidad (d) 7cm profundidad

Figura 5. Microscopía de pasta de cemento y áridos alteración debido al fuego.
a) 1,5cm prof, b) 3cm prof, c) 5cm prof, d) 7cm prof.

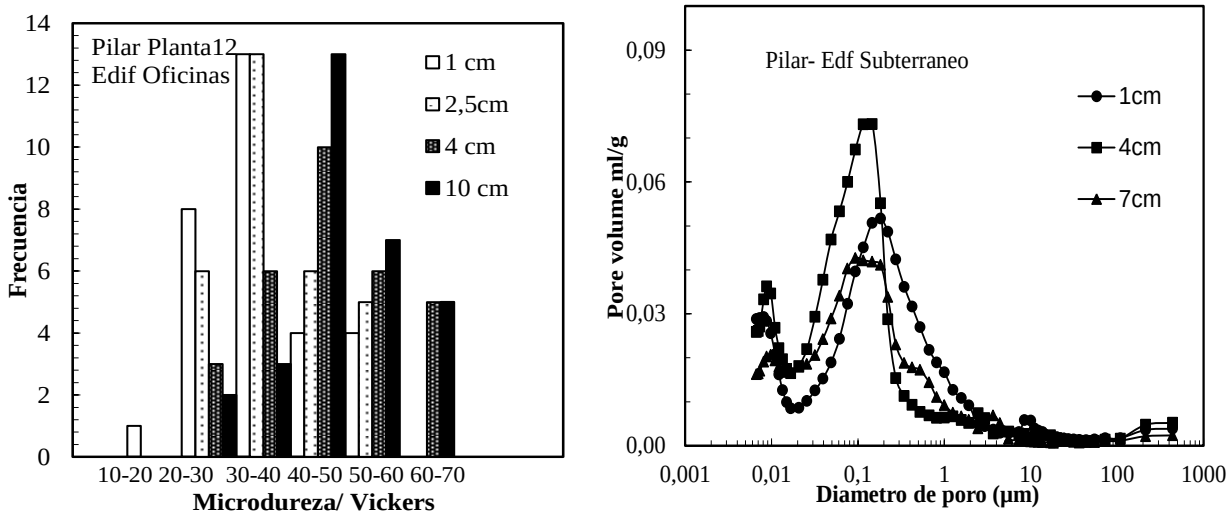
En el caso del hormigón de las vigas pretensadas de la construcción subterránea y del túnel que sufrieron explosiones violentas tempranas, se apreció una microfisuración intensa en la masa del hormigón, tanto en los áridos como en la pasta de cemento (Alonso, 2008-2). Sin embargo la pasta de cemento no mostró signos de alteración química. Estos daños se atribuyen a las explosiones debido tensiones térmicas causadas durante el incendio (Alonso, 2006-1).

La microscopía electrónica SEM permite también identificar la degradación de la pasta de cemento y áridos, pérdida de la densidad del material y unión entre la pasta y los áridos que son indicativos de que el hormigón ha estado expuesto a temperaturas superiores a 350 ºC, (Figura 5).

La presencia de cristales de etringita indica que la temperatura ha alcanzado valores por debajo de 100 º C a la profundidad específica, como se aprecia en la Figura 5d (ver flechas indicadoras). La parte más exterior está fuertemente afectada por el incendio, presenta menor densidad que varía en función de la profundidad, Figuras 5a y 5b. La microfisuración de la pasta se intensifica en las

regiones intermedias donde la temperatura no ha sido lo suficientemente elevada para llegar a una deshidratación localizada. Las microfisuras crecen a partir de estas zonas y desde los áridos debido a las diferentes expansiones térmicas entre pasta y árido.

La determinación de la microdureza en la pasta de cemento ha permitido también identificar zonas con diferente grado de deterioro debido a las alteraciones químicas de la pasta, (Figura 6a). La microdureza de la pasta es menor en las zonas de hormigón más exteriores y por tanto más expuestas debido a la menor densidad del material, hecho que se confirma al medir la porosidad también en función de la profundidad detectándose una disminución del tamaño de poro en las zonas internas, como se deduce de la Figura 6b, al ir a profundidades mayores el hormigón esta menos afectado por las transformaciones químicas, por lo que la medida de la porosidad también se ha podido emplear como parámetro indicador de daño. El aumento de la porosidad generalmente está asociado con procesos de deshidratación, pero también debido a la formación de microfisuración, (Alonso, 2006-1-2).



(a) (b)

Figura 6. a) Variaciones en microdureza en la pasta en función de la profundidad.
b) Variaciones en porosidad en función de la profundidad, edificio sótano.

Existe una relación entre el grado de transformación del gel CSH y la microdureza y porosidad del material, como se aprecia en la Figura 7, a mayor grado de transformación o deshidratación del gel CSH, menor microdureza en la pasta y mayor porosidad.

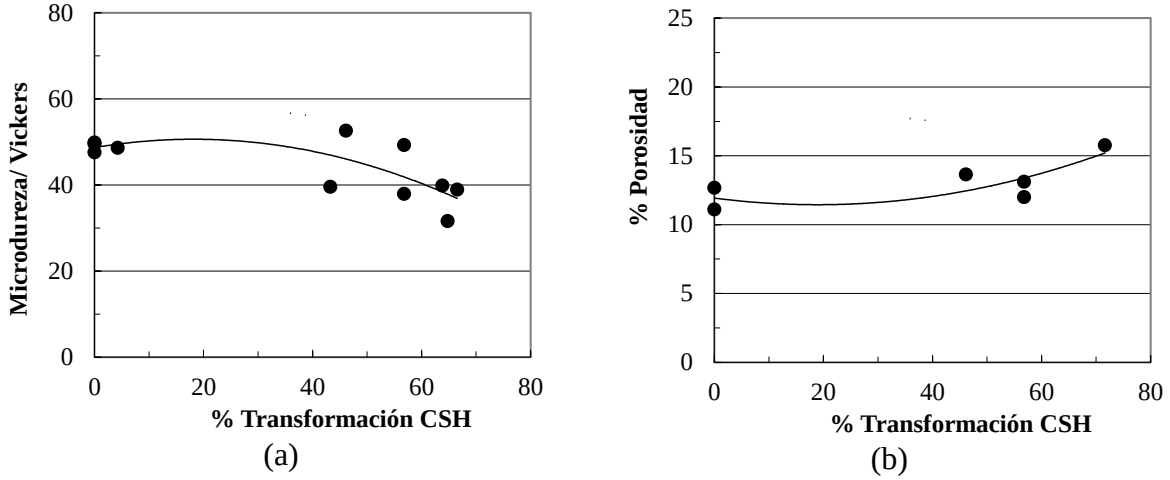


Figura 7. Perdida de propiedades vs. Alteración del gel CSH en la pasta. Microdureza (a), porosidad (b)

Las armaduras pueden ver alteradas también sus propiedades si se supera una cierta temperatura crítica, que en los códigos y normas de incendio se sitúa en torno a 500ºC, ya que a esta temperatura el acero comienza a perder sus propiedades mecánicas de forma significativa. En la Figura 8 se recogen resultados de rotura de fragmentos de armado, se aprecia que las elevadas temperaturas actuando sobre el acero han inducido fenómenos de fragilización muy significativos con importantes pérdidas de propiedades tanto en carga máxima como en deformación.

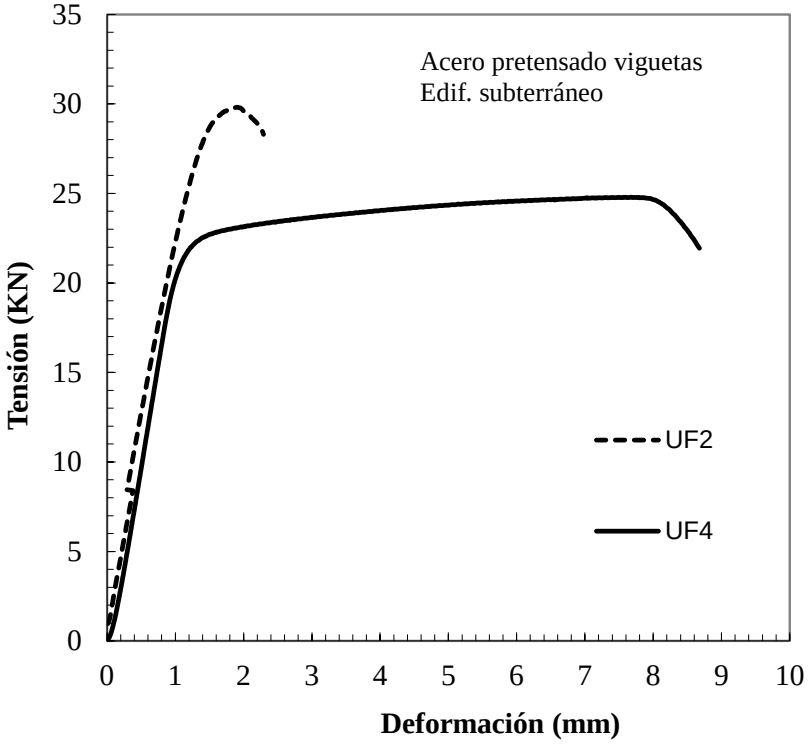


Figura 8. Cambios en las propiedades mecánicas de acero de viguetas pretensadas por la acción del fuego.

5. ANALISIS DE LOS METODOS NDT Y DT PARA DETERMINAR LA PROFUNDIDAD DEL DAÑO POST-INCENDIO EN ESTRUCTURAS DE HORMIGON

Aunque hay varias técnicas para determinar la profundidad del hormigón que resulta alterada por la temperatura, el uso individualizado no permite determinar con precisión la profundidad de hormigón afectada por el fuego, y algunas de ellas no son capaces de discriminar entre el tipo de daño, físico o químico. Ninguno de los métodos por sí solo, ni NDT ni DT es capaz de determinar la pérdida de resistencias mecánicas, incluso con la medida directa a compresión, debido a la presencia de un gradiente de daños en los elementos de hormigón.

La medida de la velocidad de ultrasonidos tiene la ventaja de ser una técnica NDT capaz de diferenciar entre zonas dañadas y no dañadas. Sin embargo, la profundidad de la capa de hormigón afectada es difícil de determinar por este método, ya que la variación de la velocidad del ultrasonido cambia no solo con la deshidratación de la pasta de cemento, sino también por la formación de fisuras. Sin embargo, la presencia de fisuras no significa necesariamente una alteración química de los componentes del hormigón, de hecho, la mayoría de las fisuras se deben a las tensiones térmicas que se producen durante el incendio (Alonso, 2006-1).

Las medidas de la velocidad de ultrasonidos realizadas en (Calavera et al, 2004) tras el incendio del edificio de oficinas, Torre Windsor en Madrid, mostraron que los datos de ultrasonidos no siempre permiten discriminar con respecto a la profundidad del daño, y fue necesario calibrar con testigos de laboratorio que dieron lugar a una sobreestimación de la profundidad del daño a la que se consideró que la pérdida de resistencias a compresión fue relevante e irreversible, estimada en 10 cm, mientras que con los métodos del presente estudio que la profundidad máxima de daño en hormigón con alteración irreversible en los componentes se sitúa en torno a 3cm, dependiendo de la planta y zona, ya que se observó gran heterogeneidad en la distribución de los daños.

La técnicas microscópicas han permitido en el presente estudio diferenciar entre los cambios de la microestructura de la pasta, áridos, pérdida de unión y fisuración en árido/pasta, el ensayo ha sido muy útil para diferenciar e identificar el origen de los daños.

En el presente trabajo se han encontrado buenas correlaciones entre los distintos indicadores de daño que incluyen: microdureza de la pasta, porosidad y la transformación en el gel CSH. Se ha visto que es necesario una transformación de al menos el 55% del gel CSH para inducir cambios relevantes en las otras propiedades, deducido en Figura 7.

Los estudios termogravimétricos han permitido identificar los cambios químicos locales en la pasta de cemento y el nivel de deshidratación del gel CSH de la pasta, que es el componente responsable del desarrollo de las resistencias del hormigón. Las variaciones en la transformación del gel CSH y los cambios de deshidratación de la pasta a distintas profundidades en elementos de hormigón de diferentes plantas en el edificio de oficinas indicaron que la alteración del hormigón debido al fuego había penetrado un máximo de 3 cm (Alonso, 2006-2), lo que se aleja significativamente de los valores predichos en (Calavera y al, 2005). En la Figura 9 se muestra la profundidad a la que ha llegado el fuego y se han alcanzado temperaturas superiores a 500ºC, obtenidas a partir de integración de los resultados de las distintas metodologías de ensayo.

Los resultados del análisis conjunto de las distintas técnicas empleadas ha permitido identificar que el daño inducido por el fuego en los elementos de hormigón es muy heterogéneo en las tres estructuras, y la razón se atribuye al hecho de que en un escenario real el fuego no es homogéneo dentro de la estructura, e incluso dentro de la misma planta o de un pilar en el caso de un edificio o en función de la altura del túnel o distancia al foco de calor o donde tiene lugar la explosión. La

temperatura de la superficie varía de una zona a otra y también la duración de la intensidad del incendio, de modo que el efecto del daño en el hormigón también es diferente.
En el caso del edificio de oficinas la extensión del daño varió de una planta a otra. Entre los pisos 12 a 19 las diferencias fueron muy relevantes y los resultados mostraron que en los pisos más altos la profundidad del hormigón afectado por el fuego no penetró más de 1,5 cm, mientras que en los pisos inferiores de la profundidad del hormigón dañado alcanzó hasta 3 cm, mientras que en el edificio sótano que el fuego fue de más larga duración la degradación química irreversible de los materiales alcanzó hasta 7 cm, y que en el caso del túnel no supero 1 cm en la zona de explosión y el daño fue de tipo mecánico.
Finalmente se ha podido identificar a partir de los datos de caracterización del gradiente de alteración de los componentes del hormigón las isotermas de temperatura en función de la profundidad. Aplicando la metodología al caso concreto de los pilares del edificio de oficinas ha sido posible determinar la resistencia al fuego ofrecida por dichos elementos cuando las condiciones de exposición fueron las más adversas. Se identificó que la resistencia al fuego ofrecida fue de una RE90, como se deduce en el ejemplo recogido en la figura 9. Finalmente a partir de los datos de la evaluación en cuanto a profundidad del daño y temperatura asociada al deterioro se ha podido identificar la profundidad de la isoterma de 500 º C, como se refleja en (Alonso, 2008-2) que ya puede ser utilizada para el cálculo posterior de la capacidad residual de la estructura post-incendio y poder decidir sobre la profundidad de la reparación o en su caso la demolición de la estructura.

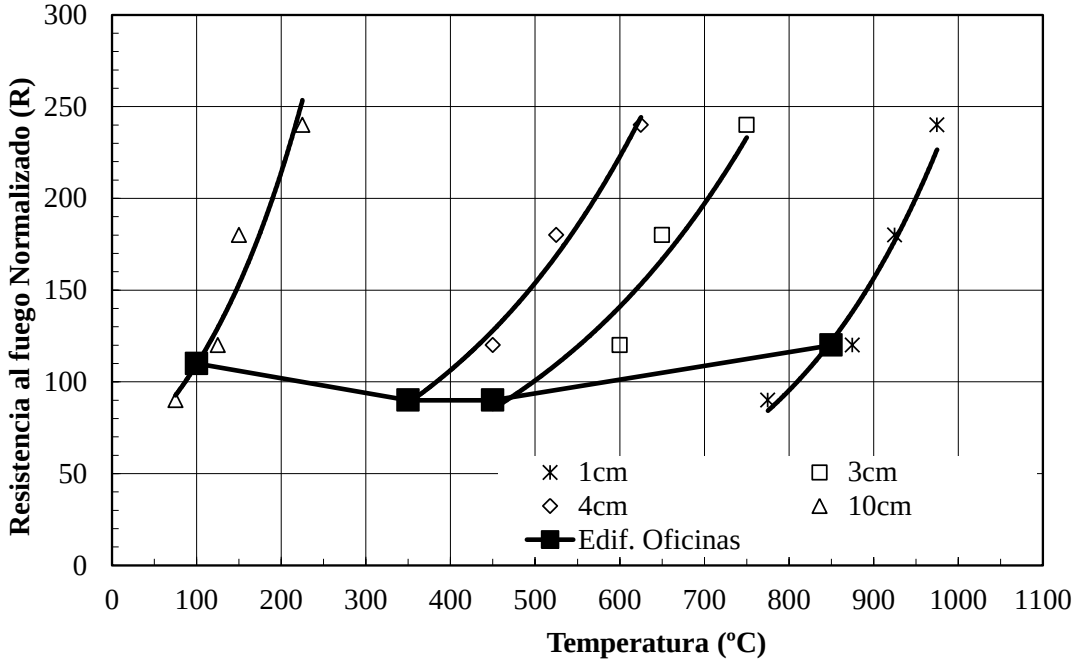


Figura 9. Isotermas de temperatura en pilares de hormigón del edificio de oficinas expuesto al fuego. Determinación de la profundidad de la isoterma de 500 º C.

6. CONCLUSIONES

1. La profundidad del daño en el hormigón en un incendio real es muy heterogénea y depende mucho de la tipología de estructura y de las condiciones de exposición.

2. El uso simultáneo de distinto tipo de ensayos y de técnicas de tipo DT y NDT, han permitido diferenciar entre los distintos niveles de daño, para identificar indicadores de daño en estructuras post-incendio.
3. El uso de la técnica de medida de la velocidad de ultrasonidos como técnica no destructiva, permite la identificación de las áreas dañadas de la estructura, pero no proporciona información de la penetración del daño.
4. El ensayo de Termogravimetria (ATD/TG) es un método que permite con determinar la degradación química en la pasta de cemento. La determinación del porcentaje de transformación del gel CSH en la pasta permite discriminar entre zonas degradadas por la acción del fuego frente a zonas no alteradas químicamente.
5. El análisis por microscopía electrónica permite diferenciar entre zonas sanas y zonas alteradas y es un buen método para identificar la presencia de grietas y su distribución en la masa del hormigón. Es posible identificar la profundidad del daño y diferenciar entre daños por alteración química física o mecánica (explosión).
6. Es posible localizar con suficiente precisión la isoterma de 500 º C a partir de ensayos sobre la microestructura.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a MEC de España por el apoyo a este trabajo, PSE 11, ABITAT 2030, PSS-380000-2008-14

8. BIBLIOGRAFIA

Alonso, C. and Fernandez-Municio, L. (2004), *Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments*, J. Mater. Sci. 39, pp.3015-3024.

Alonso, C. y Fernandez-Municio, L. (2005*),"Procesos de deshidratación en la pasta de cemento tras su exposición al fuego. Relación entre las transformaciones micro y macroestructurales"*, Cuadernos de seguridad frente a incendios, pp.57-64.

Alonso, C. (2006-1), *"Assessment of damage in concrete structures exposed to fire. Micro and macrostructural analysis".* 4th Int. WS. Structures in Fire, SIF´06, Aveiro, pp599-611.

Alonso, C. (2006-2), *"Influence of fire in the damages of concrete in the Windsord Building"*. Int Cong on Fire safety in tall buildings, Santander, Spain, pp.111-127.

Alonso, C. and Fernandez-Municio, L. (2008-1), *"Dehydration and rehydration processes in cementitious materials after fire. Correlation between micro and macrostructural transformations"*. FIB workshop on Fire design of concrete structures. Edt JP Cirreia Rodrigues, G.A. Khoury and N.P. Hoj, Ed. Fib, Coimbra, pp.69-78.

Alonso, C., (2008-2),*"Assessment of post-fire reinforced concrete structures. Determination of depth of temperature penetration and assiciated damage*", Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Edt. M.G. Alexander, H.D. Beushausen, F. Dhen & P. Moyo, 1, pp.471-477.

Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu E. y Ehrlacher,A. (2005), *"The use of termal analysis in assesing the effect of temperatura on a cement paste"*, Cem and conc Rs., 35, pp.609-613.

Bamonte, P, Gambarova, P.G., Maggioni, A. and Lo Monte F. (2011), "*A proposal for an experimental set-up to investigate fire-induced corner damage in R/C members*", 2cd int RILEM WS on Concrete Spalling due to fire exposure, Delf, (2011) pp.369-383.

Bazant, Z.P. y Kaplan, M.F. (1996), *"Concrete at high temperatures: Material properties and mathematical modells"*. Logman Grp. Ltd. , England .

Benedeti, A. (1998), *"On the ultrasonic pulse propagation into fire damaged concrete",* ACI structural J., 95 (3).

Benedetti, A. and Mangoni, E. (2004), *"Damage assessment in actual fire situations by means of non-destructive techniques and concrete tests",* WS Fire design of concrete structures: what now?, what next? edt P. Gambarova, R. Felicetti, A. Meda and P. Riva, Milan, pp.231-239.

Chan, S.Y.N., Luo, X. and Sun, W. (2000), *"Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete",* Construction and Building Mat. 14, pp.261-266.

Calavera, J. Izquierdo J.M. (2005), *"Fire in the Windsor building. Survey of the fire resistance and residual bearing capacity of the structure after the fire"*. NIT INTEMAC, dec., pp.1-35.

Cioni, P., Croce, P. Salvatore, W. (2001), *"Assessing fire damage to R/C elements",* Fire Safety J., 36, pp.181-199.

Colombo, M. and Felicetti, R. (2006), *"New NDT techniques for the assessment of fire damaged concrete structures"*. 4th Int. WSp. Structures in Fire, SIF´06. Aveiro, pp.721-734.

Felicetti, R. (2004-1), *"The drilling resistance test for the assessment of the thermal damage concrete"*, WS Fire design of concrete structures: what now?, what next?, edt P. Gambarova, R. Felicetti, A. Meda & P. Riva, Milan, pp.241-248.

Felicetti, R. (2004-2), *"Digital camera colorimetry for the assessment of fire-damaged concrete"*. WSp Fire design of concrete structures: what now?, what next?, edt P. Gambarova, R. Felicetti, A. Meda and P. Riva, Milan, pp.211-220.

Felicetti, R. (2008), "*Recent advances and research needs in the assessment of fire damaged concrete structures"*, fib workshop on Fire design of concrete structures. Edt JP Cirreia Rodrigues, G.A. Khoury and N.P. Hoj, Ed. Fib, Coimbra, pp.483-487.

Fletcher, I., Borg, H., Hitchen, N. y Welch, S. (2006), *"Performance of concrete in fire. A review of the state of the art with a case study of the Windsor Tower fire"*. 4th Int. WSp. Structures in Fire, SIF´06. Aveiro, pp.79-790.

Huang, Z. (2010), *"Modelling the bond between concrete and reinforcing Steel in fire*", Engineerinig Structures, 32, pp.3660-3669.

Ingham, J.,(2009), "*Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures*", Materials Characterisation, 60, pp700-709.

Jau, W.-Ch. and huang K-L.A (2008), "*study of reinforced concrete corner columns after fire*", Cement & Concrete Composites 30, pp.622–638

Khoury, G.A. (1992), *"Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment"*, Magz of Conc Rs. 161, pp.291-309.

Kodur, V. Dwaikat M. and Rout, N., (2009), "*Macroscopic FE model tracing the fire response of reinforced concrete structures*", Engineering Structures, 31, pp. 2368-2374.

Piasta, Z. Sawicz, y L. Rudzinski, (1984), *"Changes in structure of hardened cement pastes due to high temperatura",* Mater. & Struct. 17, pp.291-295.

Piasta, P. (1984), *" Heat deformation of cement phases and microstructure of cement paste"*, Mater. & Struct. 17, pp.415-420.

Rilley, M.A. (1991), *" Possible new method for assessment of fire-damaged concrete",* Magz. of Conc. Rs., 43, pp.87-92.

Rostasy, F., Ehm,C. y Hinrichsmeyer,K. (1987), *"Structural alterations in concrete due to thermal and mechanical stresses"*. Int Cong. Pore Structure and Contruction Materials Properties, Versailles.

Schneider, U. (1990), *"Reparability of fire-damaged structures",* Fire Safety J. 16, pp.251-336.

Short, N. y Purkiss, J. (2004), *"Petrographic analisis of fire damaged concrete".* WSp Fire design of concrete structures: what now?, what next?, edt P. Gambarova, R. Felicetti, A. Meda and P. Riva, Milan, pp.221-230.

Stawiski, B., (2006), "*Attempt to stimate fire damage to concrete building structures*", Archives of Civil and Mechanical Engineering, 4, VI, pp23-29.

Tay, D.C. y Tam, C.T. (1996), *"In situ investigation of the strength of deteriorated concrete".* Construction & building materials, 10 (1), pp.17-26.

Tay, D.C. & Tam, C.T. (1996), *"In situ investigation of the strength of deteriorated concrete*". Construction & building materials, 10 (1) pp.17–26.

Zhang, X. Du, H.X. Zhang, B. & Philips, D.V. (2002), *"Assessment of fire damage of concrete by using infrared thermal imaging method",* Int Cong. Concrete for extreme conditions, Edt R. K. Dhir, M. J. McCarthy & M D. Newlands, pp.590-604.