

ARTÍCULO SELECCIONADO DEL CADI 2016

Efectos de la temperatura sobre las propiedades termo-mecánicas de hormigones de alto rendimiento

Myriam Marcela Ledesma¹

Ricardo Horacio Lorefice²

Mauro Asili³

¹Universidad Nac. de Sgo. del Estero

E-mail: mmledesma@unse.edu.ar

²Universidad Nac. de Sgo. del Estero

E-mail: rlorefice@gmail.com

³Universidad Nac. de Sgo. del Estero

E-mail: mauroasili00@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis de la influencia de la acción de temperaturas elevadas sobre las propiedades termo-mecánicas de hormigones de alto rendimiento. Características como la conductividad térmica, el calor específico, el coeficiente de expansión térmica y propiedades mecánicas tales como módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, energía de fractura, etc. son funciones de la temperatura e inciden en el comportamiento estructural de elementos de hormigón, por lo cual deben ser consideradas específicamente en el diseño de estructuras con riesgo de sufrir acciones térmicas elevadas como el caso de edificios en altura sometidos a incendios. El empleo cada vez más frecuente de hormigones de alto rendimiento, junto con la mayor tendencia al descascaramiento de los mismos pone de manifiesto la relevancia de este tipo de estudios.

Palabras clave: hormigones de alto rendimiento - propiedades termo-mecánicas - descascaramiento.

1. INTRODUCCIÓN

El uso cada vez más frecuente de estructuras de hormigón más esbeltas y de formas complejas, con requisitos de economía, durabilidad, resistencia y espacio aún más exigentes, impulsa el empleo de los denominados "Hormigones de alto rendimiento" en forma significativa. Si bien el término "rendimiento" comprende propiedades esperables en este tipo de hormigones, como ser, alta resistencia inicial, durabilidad al congelamiento y deshielo, resistencia a la penetración al cloro, baja permeabilidad, etc., su elevada resistencia es la principal y más requerida característica. Aun así, hay aún una acción que obliga a una evaluación más minuciosa de su comportamiento: Cómo se ve afectada la resistencia ante la acción de temperaturas elevadas y su prolongada exposición a ellas, pues en obras

civiles, una adecuada resistencia a las altas temperatura en casos de incendio se convierte en un requisito indispensable. Esta puede depender de su geometría, los materiales de los cuales está construida, la intensidad de la carga y las características del incendio en sí mismo. Entre esos factores, podrían ser: los gradientes de temperatura, conductividad térmica del hormigón, composición de los agregados, composición de la pasta cementicia, contenidos de aditivos, calores específicos etc. En el caso de hormigón armado, también incide la armadura, el contenido de fibras, el tipo de estribos utilizado, la separación de estribos etc.

2. ESTADO DEL ARTE

Luego de la tragedia de World Trade Center en el año 2001, aumentaron las recomendaciones sobre la performance de los hormigones a las acciones de las elevadas temperaturas. Es así que desde los distintos comités se puso énfasis en mejorar los estándares de construcción, códigos y prácticas a los efectos de prevenir la falla de la estructura ocasionada por incendios.

En general las estructuras de hormigón históricamente han tenido buen rendimiento ante la acción de incendios a causa de que este material es no combustible y de baja conductividad térmica, y mientras el recubrimiento de las armaduras en los hormigones armados permanecía, el flujo de calor ingresa al interior lentamente. Por diversas razones técnicas y económicas, las pruebas contra incendios a gran escala, análisis computacionales y diseños basados en el rendimiento en hormigones han sido sólo una fracción de las destinadas a las estructuras de acero.

Desde mediados de 1900 los investigadores vienen realizando ensayos en hornos estándar, con diversas dificultades. Otros investigadores realizaron pruebas no-standard en laboratorio con hornos modificados para analizar el comportamiento de un elemento estructural específico. Tal el caso de Van Herberghen P, Van Damme M [1] que ensayaron losas continuas pretensadas. En lo re-

ferido a escala real por lo menos una vez se realizó una prueba. Así por ejemplo, Bailey[2] fue el único que presentó los resultados de un ensayo de incendio a gran escala de un edificio de siete plantas en el Reino Unido, cuyas conclusiones más relevantes fueron: la temperatura de los gases se reducían con el descascaramiento explosivo (spalling) que se extendía a toda la pieza estructural y ponía la armadura al descubierto, los desplazamientos verticales son mayores en la periferia expuesta al fuego y menores en la zona central, la expansión térmica de la losa del suelo dio como resultado el desplazamiento lateral de las columnas externas.

En el caso de estructuras pretensadas, se observó que tanto en incendios reales como en pruebas con hornos que en el 30% de los casos la falla comenzó en el tendón pretensado extendiéndose a todo el elemento, llevando al colapso de la estructura aun cuando el recubrimiento de la armadura fuera de gran espesor. También se produjeron tensiones adicionales durante el periodo de enfriamiento sumándose así, grietas a la configuración de fractura.

2.1 HORMIGONES DE ALTO RENDIMIENTO

Como podemos ver, los diversos ensayos mencionados hasta aquí fueron realizados sobre muestras de NSC (Hormigones de Resistencia Normal), pero durante los últimos años se ha comenzado a imponer el uso de los HPC (Hormigones de alto rendimiento). Debido al gran número de factores que intervienen en el cálculo de la variación de la resistencia por aumento de temperatura, los códigos establecen pautas para el diseño, como por ejemplo, el EUROCODIGO2 que propone los Métodos de Cálculo Simplificados en el Capítulo 6, el Método de la Isotherma a 500°C y el Método de las Zonas y clasifica los HPC en 3 clases. En el comportamiento de los HPC a la acción de altas temperaturas pueden observarse que intervienen diversos factores:

- **Resistencia del hormigón:** Los NSC manifiestan mayor resistencia a las altas temperaturas debido a que la relación agua-cemento de su pasta cementicia es mayor que en los HPC. La mayor densidad vuelve impermeable a la pasta e impide la evacuación del agua evaporada, produciendo un aumento en la presión del vapor de agua hasta alcanzar la presión de vapor saturada que supera la resistencia a la tracción del hormigón y explosiones locales generando el descascamiento del material (spalling). A unos 300°C la presión de vapor alcanza unos 8MPa y para una resistencia a la tracción de 5MPa se producirá el descascamiento (Phan) [4].

- **Deformación:** Los ensayos en columnas demostraron que los HPC sufrían menores deformaciones con el aumento de la temperatura debido a su alta compacidad y baja dilatación. Conforme se eleva la temperatura los NSC sufren mayor contracción mientras tanto el HPC llega a una falla frágil. Ver Kodur[5] (Figura 1).

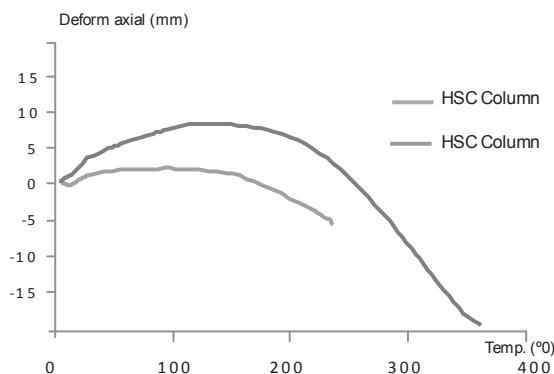


Figura 1 – Deformación axial (mm) en columnas de HPC y NSC durante la exposición al fuego. (V.K.Kodur 1999)

- **Fibras de refuerzo:** Los hormigones reforzados con fibras presentan menor daño producido por spalling debido a que la fusión de la fibra a unos 170°C se crean canales que permiten la liberación del vapor de agua, reduciendo así la presión de poros.

- **Tipo de agregado:** Los agregados con contenidos de carbonato manifiestan mayor resistencia que los que poseen silicatos. Este se debe a que los carbonatados poseen mayor calor específico y absorben mayor

cantidad de calor para elevar el mismo salto de temperatura. (Kodur 2001).

- **Distribución de temperatura:** Debido a su gran densidad, el HPC posee menor conductividad térmica que el NSC. De esta manera, el calor demora menos tiempo en alcanzar el centro de la pieza en el hormigón normal [5] (Figura 2).

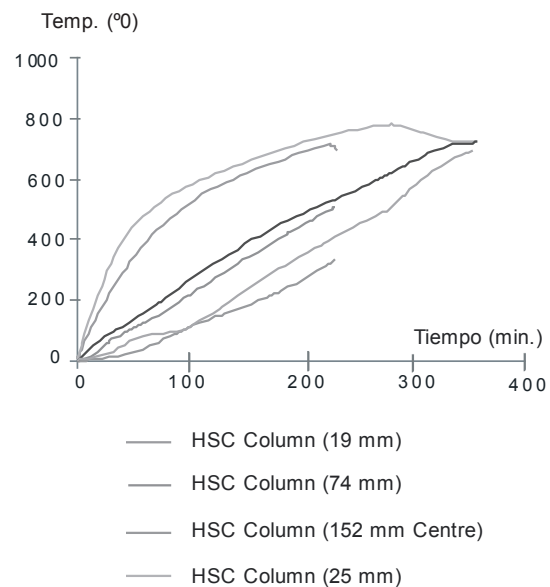


Figura 2 – Temperatura (°C) a varias profundidades en columnas de HPC y NSC durante la exposición al fuego (V,K,Kodur 1999).

- **Tipo de enfriado:** Las piezas enfriadas en aire manifiestan mayor resistencia que las enfriadas en agua desde los 20°C hasta los 200°C y desde los 400°C en adelante. Cuando la pasta de cemento alcanza los 200°C se evapora el agua libre y es removida el agua de cristalización, pero si se enfría con agua una fracción del agua evaporada es recuperada.

- **Duración e intensidad del fuego:** Cuando más alta es la tasa de transmisión del calor, mayor es el efecto del spalling en los HPC. De igual manera, la mayor duración lleva antes a la falla al HPC debido al descascamiento a menos que se encuentre reforzado por estribos laterales de manera que contiene la dilatación térmica del corazón de la pieza, como es el caso de columnas (Kodur)[8] (Figura 3).

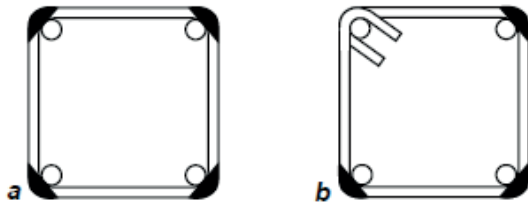


Figura. 3 a) Configuración de estribos
b) configuración aconsejada

- **Tipo e intensidad de la carga:** Una pieza de hormigón sujeto a cargas es más susceptible de sufrir mayor descascaramiento que uno descargado.

3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS HORMIGONES DE ALTO RENDIMIENTO SOMETIDO A ALTAS TEMPERATURAS.

Los factores mencionados en el Tópico anterior inciden en el comportamiento de los hormigones de alta performance ante la ocurrencia de incendios y pueden observarse a nivel macroscópico, mediante las pruebas de laboratorio o de situaciones reales.

Pero no siempre es accesible realizar dichas pruebas y en esos casos un modelo numérico del comportamiento del hormigón es una solución rápida y bastante precisa.

Perro justamente el comportamiento del hormigón sometido a elevadas temperaturas es altamente No Lineal. Sucede que con el aumento de temperatura, todos los parámetros que caracterizan al material, cambian y un modelo constitutivo debe tener en cuenta en su formulación todos esos aspectos. Dichos aspectos se analizan a continuación.

3.1. COEFICIENTE DE DILATACIÓN LINEAL.

El EUROCÓDIGO1-Anexo D (Informativo) presenta una tabla de coeficientes de dilatación de diversos materiales entre los cuales se encuentra el hormigón. Pero como es bien conocido, el coeficiente de dilatación permanece constante siempre que los cambios de temperatura no sean considerables.

R. de Borst y P. Peters (1989)[9] realizaron

ensayos sobre dos series de probetas cilíndricas y consideraron que tanto el coeficiente de dilatación lineal como la resistencia a la compresión otras propiedades mecánicas del hormigón dependen de la temperatura. Los especímenes se encontraban restringidos en su la dirección vertical cuando se sometieron a un incremento de temperatura y al ser impedidos se generaron tensiones. Además durante la primera parte del calentamiento, los especímenes experimentan otra componente de deformación denominada deformación transitoria o creep transitorio. Los resultados se muestran en las Figuras 4 y 5.

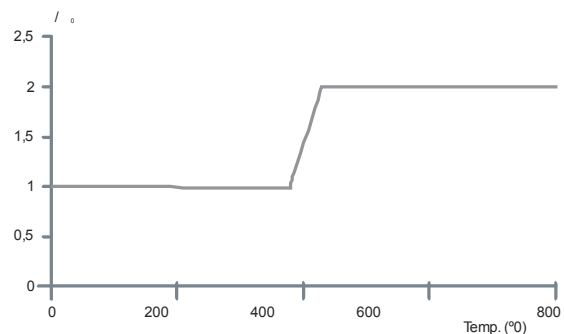


Figura 4. Variación del coeficiente de dilatación a/a_0 (R. de Borst-P. Peters 1989)

Claramente se observa en la figura 4 que el coeficiente de dilatación permanece constante hasta aproximadamente los 400°C y se duplica bruscamente entre los 400°C y los 450°C. En la figura 5 se observa el cambio en la tensión con el aumento de la temperatura.

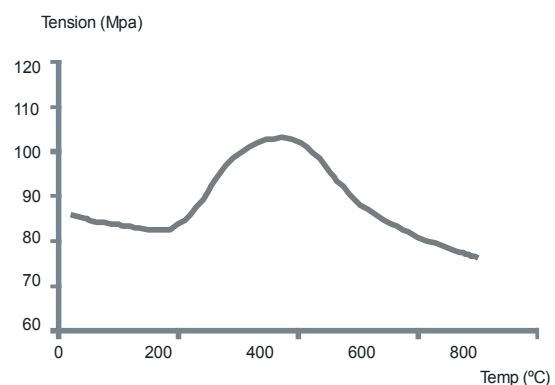


Figura 5. Tensión axial (MPa) en función de la temperatura para probetas restringidas superior e inferiormente.

Un ajuste sobre la curva arroja un polinomio:

$$\sigma = -9E-14t^6 + 2E-10t^5 - 2E-07t^4 + 5E-05t^3 - 0,0086t^2 + 0,4947t + 78,855 \quad (1)$$

A temperaturas muy elevadas se observa que la tensión se reduce notablemente. Esto puede ocurrir por el cambio de otras propiedades mecánicas, como ser el módulo elástico.

3.2 MÓDULO ELÁSTICO

El módulo elástico obtenido de la misma prueba que se obtuvo el coeficiente de dilatación relativo al de temperatura ambiente. Este parámetro es muy importante para tener en cuenta en una formulación numérica. Figura 6.

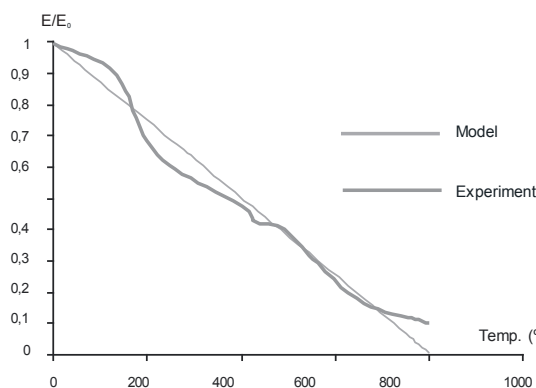


Figura 6. Dependencia del Módulo de Young con la temperatura (E/E0) (R. de Borst-P. Peters 1989).

Realizado un ajuste sobre la curva experimental se adapta mejor una función polinómica de 6° grado:

$$E/E_0 = -2E-16t^6 + 6E-13t^5 - 6E-10t^4 + 3E-07t^3 - 7E-05t^2 + 0,0046t + 1 \quad (2)$$

3.3 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

No se disponen en bibliografía datos de la variación de la conductividad térmica en HPC. Se presentan aquí comparaciones de códigos y predicciones para NSC. (Raut) [10]

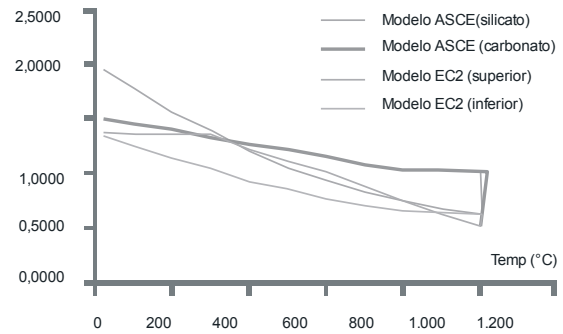


Figura 7. Conductividad térmica (W/m°C) en función de la temperatura para NSC (Raut 2011).

3.5 VISCOSIDAD

Un parámetro muy importante relacionado con la reología del hormigón es la viscosidad de la pasta cementicia. En formulaciones viscoelásticas y elasto viscoplásticas que permiten modelar numéricamente fenómenos de relajación y fluencia lenta en estructuras (creep) cobra vital importancia su variación en el tiempo, ver (Ledesma, Loreface et al) [11][12][13][14]. A su vez, cuando las piezas de hormigón están sometidas a incrementos de temperatura este parámetro varía conforme ésta aumenta. En minerales esta variación viene dada por:

$$\eta = \eta_0 \exp[-(E^* + P^*)/R] \quad (3)$$

Donde T=temperatura R= constante del gas
P= Presión A= constante V=volumen

E= energía de activación (efectos de P y T)
f(s) = función de la diferencia de tensiones principales |s1-s3|.

4. MODELOS CONSTITUTIVOS

Los factores expuestos anteriormente ilustran el complejo panorama que surge al analizar el comportamiento de hormigones normales y de alta resistencia o alto rendimiento cuando los mismos son sometidos a acciones térmicas elevadas. Es evidente que dadas las complejidades del fenómeno, su modelación experimental implica también severas dificultades, ya que la cantidad de configuraciones estructurales, materiales y escenarios



posibles de modelación son numerosas, y los resultados obtenidos solo serían válidos dentro de márgenes acotados, y solo en esencia para el caso de estudio específico. En este sentido es que cobran gran relevancia los métodos computacionales, los cuales permiten realizar simulaciones numéricas variando gran cantidad de parámetros y realizar el análisis de diversos escenarios, a fin de realizar las calibraciones propias de cada modelo. En particular, las técnicas actuales de modelación implican el desarrollo de modelos constitutivos avanzados, aptos para simulación de materiales ingenieriles, y que permitan captar las principales fases de falla durante el desarrollo del fenómeno, tales como ocurrencia de grandes deformaciones, plasticidad, fractura, fenómenos acoplados termo mecánicos, etc. Una mención especial merecen los modelos no lineales viscoelastoplásticos a nivel mesomecánico, ver Ledesma, Lorefice et al [11][12][13][14] los cuales con apropiada calibración pueden emplearse para el estudio del comportamiento de hormigones de alta resistencia simulando el proceso de fractura, deformaciones diferidas, relajación, etc.

5. CONCLUSIONES

La gran complejidad que implica el estudio de procesos de falla de materiales ingenieriles, en particular el hormigón y el hormigón armado, tanto en sus variantes convencionales y de alta resistencia, pone de manifiesto la relevancia de las investigaciones en curso sobre acciones térmicas en las construcciones. En particular, en nuestro país, en el cual por razones de costos las estructuras de hormigón y hormigón armado predominan ampliamente sobre el resto, es de crucial interés el potenciar las investigaciones en este campo mediante la técnica numérico-computacional, lo cual permitirá achicar la brecha tecnológica con los países más desarrollados al generar conocimiento e investigaciones propias. La presente contribución se enmarca dentro de esta línea de trabajo, formando parte de un proyecto de investigación recientemente iniciado y que posee como finalidad

desarrollar modelos computacionales de análisis aptos para la solución de problemas estructurales concretos, y en particular el caso de estructuras sometidas a acciones termo mecánicas.

6. REFERENCIAS

- [1] VAN HERBERHEN, P; VAN DAMME, M (1983) Fire Resistance of Post-Tensioned Continuous Flat Floor Slabs with Unbonded Tendons, FIP, , pp. 3-11. 1983
- [2] BAILEY CG (2002). Holistic behaviour of concrete buildings in fire. Structures and Buildings 152(3): 199–212
- [3] EUROCODIGO 2 (2011) – Proyecto de Estructuras Sometidas al fuego – Versión en Español de las Normas Europeas EN 1992-1-2:2004 y EN 1992-1-2:2004/AC.2008. Comité Europeo de Normalización. Madrid.
- [4] PHAN, L. T. (1996) NISTIR 5934 – Fire performance of high-strength concrete: a report of the state-of-the-art. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA
- [5] KODUR, V.K.R (1999).- Fire Performance of High-Strength Concrete Structural Members –Construction Technology Update N°31. National Research Council of Canada ISSN 1206-1220
- [6] KODUR, VKR; GARLOK, MEM; IWANKIW, N (2007) NISTGCR 07–915 – Structures in fire: state of the art, research and training needs. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA
- [7] HUSEM, METIN (2006) The effects of high temperature on compressive and flexural strength of ordinary and high performance concrete- Fire Safety Journal March2006.pgs 155-163
- [8]EUROCODIGO 1- Acciones en estructuras- Parte 1-5 Acciones Térmicas. Versión en Español de las Normas Europeas EN 1992-1-2:2004 y EN 1992-1-2:2004/AC.2008. Comité Europeo de Normalización. Madrid.
- [9] R. DE BORST ; PETERS P . Analysis of concrete structures under thermal loading. Computers methods in mechanic applied and engineering 77. Págs 293-310. North Ho-

lland. 1989.

[10] RAUT NIKHIL, Response of High Strength Concrete columns under fire Induced. Biaxial Bending. Tesis Doctoral. Michigan State University. 2011

[11] LEDESMA, M; LOREFICE R.; ETSE G.(2009) Ensayos numérico-computacionales del proceso de fractura de hormigones de alta resistencia. ENIEF 2009. Mecánica Computacional, Vol XXVIII, Págs. 2211-2255. Tandil Argentina, 2009.

[12] LOREFICE R ; (2007) Modelación de la Respuesta Dinámica del Hormigón mediante los criterios Meso y Macromecánicos. Tesis Doctoral, CEMNCl - Univ. Nac. de Tucuman, 2007.

[13] LOREFICE R; ETSE G. (2008) .Viscoplastic Approach for Rate-Dependent Failure Analysis of Concrete Joints and Interfaces. International Journal of Solids and Structures, 45 2686–2705,

[14] LEDESMA M, LOREFICE R; ETSE G. (2011) Evaluación Numérica de Parámetros Materiales en Hormigón de Alta Resistencia a Nivel Mesomecánico Mecánica Computacional Vol XXX, págs. 703-717, Rosario, Argentina.