

DISEÑO DE SECCIONES DE HORMIGON ARMADO CONSIDERANDO ESCENARIOS DE INCENDIO

Marcia Rizo Patrón⁽¹⁾, Ricardo H. Lorefice⁽¹⁾, Gustavo Pérez⁽²⁾

(1) Ingenieros Civiles

Centro de Mecánica Aplicada y Estructuras CMAE - FCEyT
Universidad Nacional de Santiago del Estero
e-mail: rizopatron@gmail.com

(2) Instituto de Estructuras Arturo Guzmán, Universidad Nacional de Tucumán
e-mail: gperez@herrera.unt.edu.ar

Resumen

PALABRAS CLAVE: diseño de secciones, hormigón armado, escenarios de incendio

El diseño estructural de elementos de hormigón armado considerando su exposición a diversos escenarios de carga térmica durante incendios es de especial interés en la actualidad, dados los últimos casos de estructuras que han visto seriamente comprometida su capacidad portante al ser sometidas a acciones térmicas no previstas en el cálculo estructural convencional que indican los reglamentos vigentes. El tema alcanza primordial importancia en estos días ante la proliferación de rascacielos desarrollados con estructuras de hormigón armado empleando hormigones de alta resistencia. Se analiza el comportamiento estructural de columnas de hormigón armado ante escenarios de incendio y se proponen curvas de interacción para el cálculo y verificación estructural.

Abstract

KEYWORDS: section design, reinforced concrete, fire scenarios

The structural design of reinforced concrete elements considering their exposure to various fire scenarios is of special interest at present given the recent cases of reinforced concrete structures that have been seriously compromised its carrying capacity as a consequence of thermal actions not properly considered for in the conventional structural calculation according to code design. The subject reaches relevance in these days due to the proliferation of skyscrapers built with reinforced concrete structures using high-strength concretes. We analyze the structural behavior of reinforced concrete columns under fire scenarios proposing new interaction curves for structural calculation and verification.

1 INTRODUCCIÓN

Es sabido que en nuestro medio el hormigón estructural predomina en el ámbito de la construcción de estructuras de obras civiles debido a sus ventajas comparativas en relación a otros materiales estructurales. Entre las principales ventajas de su empleo podemos citar la trabajabilidad que le permite adoptar las más diversas formas arquitectónicas, su alta rigidez con relación a elementos estructurales de acero, la gran durabilidad ante condiciones ambientales severas, su economía de producción, posibilidad de reducir tiempos de construcción mediante empleo de elementos prefabricados, etc. Una ventaja importante es la resistencia del hormigón a altas temperaturas, tales como las que pueden afectarlo en situaciones de incendio o exposición prolongada a radiaciones. Esto se debe a la masividad de las secciones de hormigón y hormigón armado, lo cual limita el incremento de temperatura en la sección transversal y en las armaduras de refuerzo, lo cual redundaría en la posibilidad de diseñar estructuras resistentes a la temperatura de manera económica. El uso de hormigón estructural es conveniente entonces en estructuras sensibles a las altas temperaturas o que puedan ser expuestas a incendios con gran riesgo de catástrofe, tales como túneles, centrales nucleares, edificios de gran altura, etc. Evidentemente, el hecho de que un material de comportamiento complejo como el hormigón sea sometido a situaciones de alta temperatura deriva en un problema de análisis de falla de extrema dificultad, por lo cual debe recurrirse en general a métodos numéricos avanzados, tal cual lo es el denominado Método de los Elementos Finitos. Un análisis realista de una estructura sometida a altas temperaturas implica la consideración de problemas acoplados en múltiples variables, con especial consideración del modelo constitutivo del material, el cual debe necesariamente incluir la dependencia con la temperatura. En este sentido, el análisis estructural de elementos sensibles para la estabilidad estructural tales como las columnas y/o tabiques esbeltos, los cuales son de uso cada vez más frecuente, debiendo cumplimentar requisitos de economía, durabilidad, resistencia y espacio cada vez más exigentes, impulsa el empleo de hormigones de mayor calidad y resistencia y por ende, más sensibles a las degradaciones térmicas. Si bien el término “resistencia” implica propiedades esperables en este tipo de hormigones, como ser, alta resistencia inicial, mayor durabilidad, baja permeabilidad, etc., estas mismas cualidades que significan ventajas para determinados casos de análisis se convierten en la principal desventaja a la hora de evaluar la capacidad estructural ante acciones que incluyan combinaciones con elevada temperatura. Las propiedades termo mecánicas del material, tales como densidad, módulo de elasticidad, resistencias a tracción y compresión, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, calor específico, etc. se reducen en diversa medida en función de la temperatura y tiempo de exposición de la sección.

El comportamiento del hormigón y los efectos de las altas temperaturas sobre sus propiedades mecánicas ha sido investigado desde los años '40. Dichos estudios constituyeron la base para las recomendaciones técnicas y previsiones para establecer la resistencia del hormigón en varios códigos normativos vigentes a la fecha. Muchos de esos estudios fueron realizados sobre hormigones de resistencia normal y unos pocos sobre hormigones de alta resistencia. Actualmente, se trabaja

en el incremento de las pruebas de laboratorio y empíricas no sólo para investigar los efectos de la temperatura sobre su resistencia última sino también del resto de sus propiedades físicas, que se ven afectadas con el aumento de la temperatura, como ser el módulo elástico, coeficiente de dilatación y conductividad térmica, entre otras.

Desde el punto de vista numérico, las investigaciones tendientes al desarrollo de modelos computacionales capaces de predecir el complejo comportamiento mecánico del material se han centrado principalmente en la respuesta del hormigón de resistencia normal y sometido a cargas estáticas o dinámicas sin contemplar el caso del aumento de temperatura, con observación a nivel macromecánico y empleando el criterio clásico de asumir al material como un medio continuo en el que el proceso de fisuración y falla se ve representado a través de una variable interna de degradación de la resistencia.

El propósito de este trabajo, es abordar el comportamiento mecánico de hormigones de diversas resistencias bajo la acción de cargas convencionales de compresión y flexión combinadas con incrementos de temperatura de variada intensidad, que se encuadran dentro del rango previsto para situaciones típicas de incendio. En estos escenarios se evalúan la incidencia de la temperatura en las propiedades físicas y mecánicas del material y su degradación progresiva para distintas calidades de hormigones con el fin de determinar mediante análisis computacionales la resistencia seccional bajo los distintos escenarios de análisis. Los ensayos numéricos se llevan a cabo mediante software específico para el análisis estructural mediante el MEF (Método de los Elementos Finitos).

2 HORMIGONES SOMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

Se presentan a continuación los resultados de las principales investigaciones acerca de la variación de los parámetros mecánicos del hormigón de acuerdo con diversos autores y reglamentos.

2.1 Coeficiente de dilatación

El reglamento europeo de construcciones civiles de hormigón, EURO CÓDIGO 1-Anexo D incluye 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) realizaron ensayos sobre dos series de probetas cilíndricas y consideraron que tanto el coeficiente de dilatación lineal como la resistencia a la compresión y otras propiedades mecánicas del hormigón dependen de la temperatura. Los especímenes se encontraban restringidos en la dirección vertical cuando se sometieron a un incremento de temperatura generándose tensiones como consecuencia de las restricciones que imponen los vínculos, ver Figuras 1 y 2.

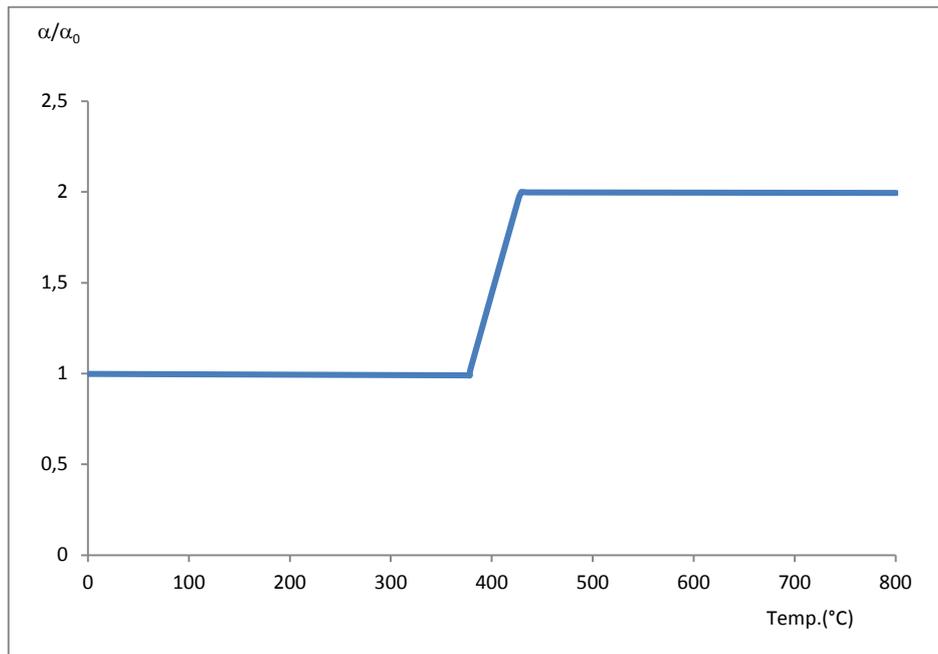


Figura 1. Variación del coeficiente de dilatación α/α_0 (R. de Borst - P. Peter, 1989)

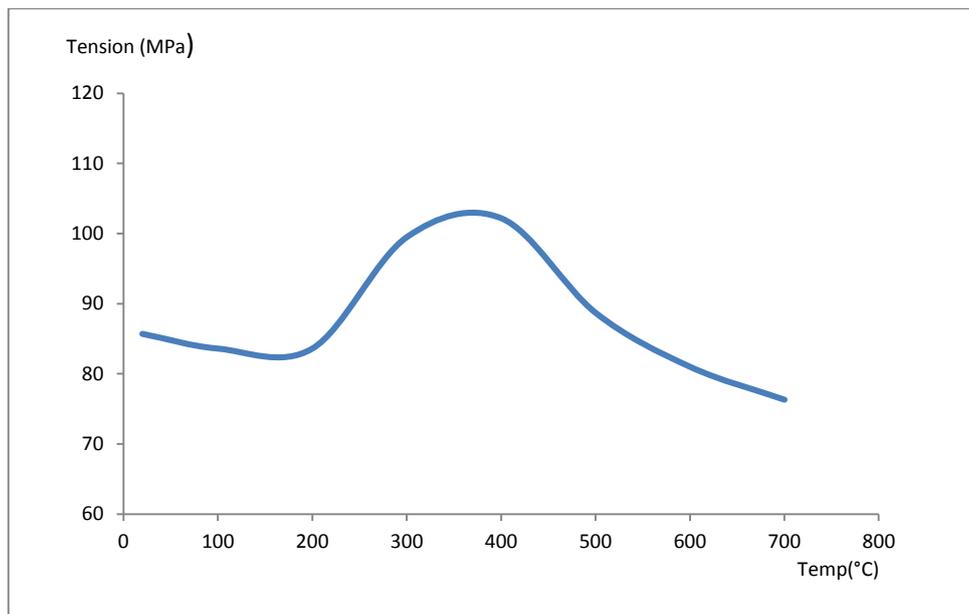


Figura 2. Tensión axial (MPa) en función de la temperatura para probetas restringidas superior e inferiormente.

Claramente se observa en la Figura 1 que el coeficiente de dilatación permanece constante hasta aproximadamente los 400°C y se duplica bruscamente entre los 400°C y los 450°C.

2.2 Módulo elástico

Un parámetro muy importante para tener en cuenta en una formulación numérica es el módulo elástico relativo al de temperatura ambiente, obtenido de la misma prueba que se obtuvo el coeficiente de dilatación, ver Figura 3.

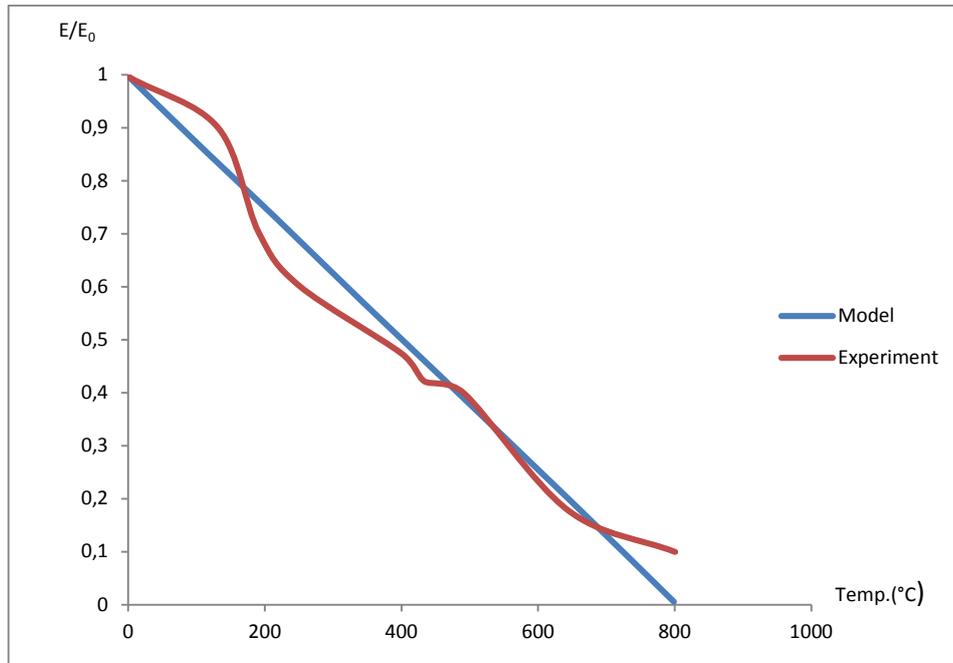


Figura 3. Dependencia del Módulo de Young con la temperatura (E/E_0)
R. de Borst y P. Peters (1989)

2.3 Conductividad térmica

La Figura 4 ilustra la variación de la conductividad térmica para hormigones normales según Raut (2011), basado en los modelos propuestos por el EC2 y la ASCE.

2.4 Resistencia a la compresión

Bastami et al (2009) proponen una relación para la resistencia a la compresión residual de una muestra con agregados de carbonato sometida a una temperatura de prueba y enfriada posteriormente. La figura 5 muestra los resultados obtenidos al aplicar modelos propuestos por diversos autores y la relación propuesta por Bastami versus los resultados experimentales de Abrams (1971).

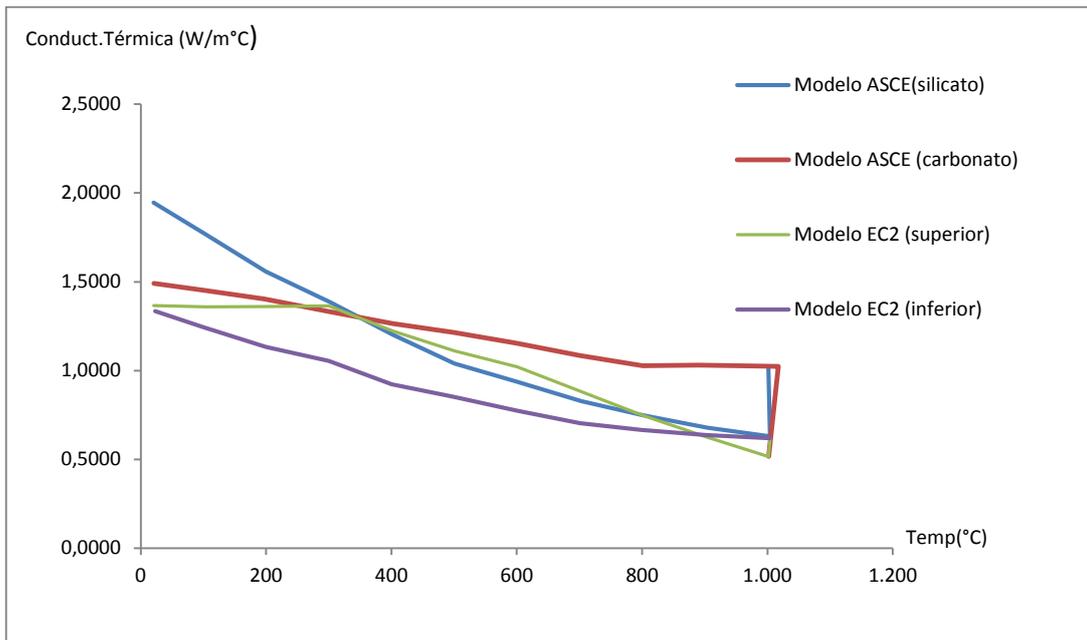


Figura 4. Variación de la conductividad térmica (W/m°C), (Raut 2011)

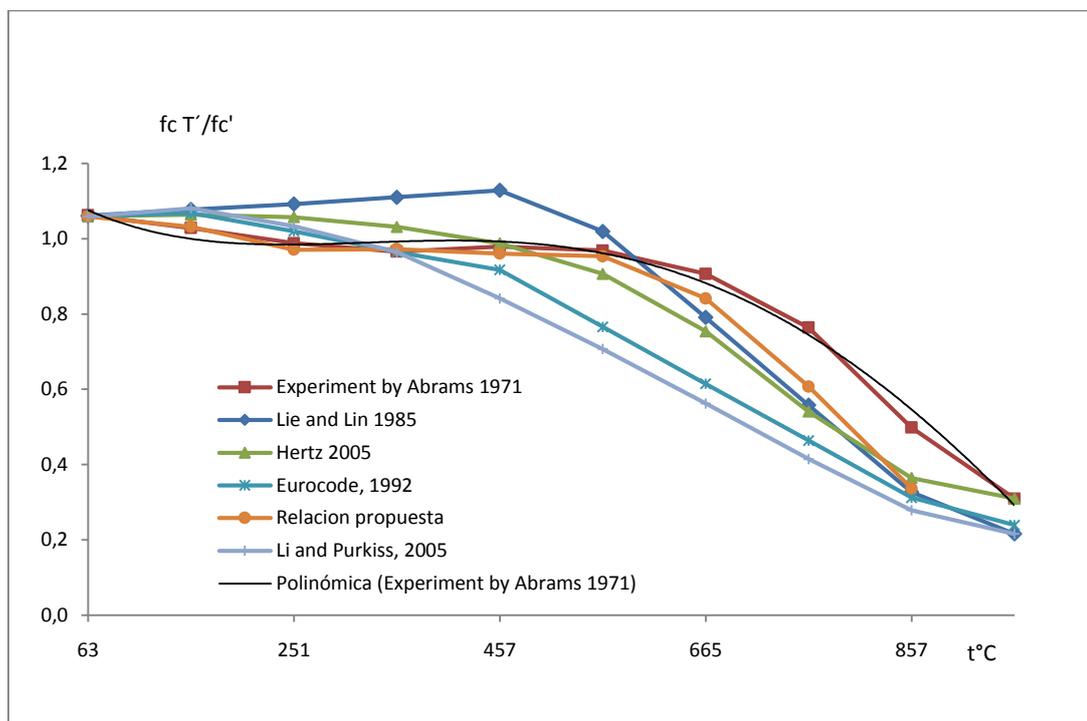


Figura 5. Resistencia a la compresión de muestras de hormigón para altas temperaturas, Bastami et al (2009)

2.5 Coeficiente de Poisson

Según los estudios experimentales, el módulo de Poisson decrece linealmente con el aumento de la temperatura. El módulo de Poisson para un hormigón con áridos cuarzíticos se reduce de $\nu = 0.22$ a temperatura ambiente a un valor de $\nu = 0.10$ a 400 °C. Esto se debe al ablandamiento de la microestructura resultante de la ruptura de las ligaduras debidas al calentamiento, Marechal (1975), Bahr (2013).

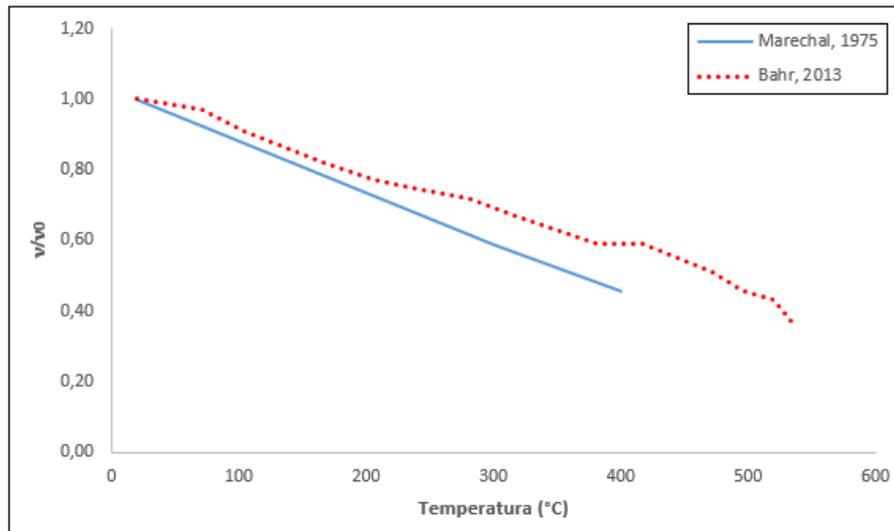


Figura 6: Evolución del coeficiente de Poisson del hormigón con la temperatura

2.6 Densidad

Con el aumento de la temperatura, los materiales como el hormigón que tienen una gran cantidad de humedad en su constitución, experimentan una pérdida de masa como resultado de la evaporación de la humedad debido a reacciones químicas. Por lo tanto, con el aumento de temperatura se aprecia una disminución de la densidad del hormigón. Se puede observar en la Figura la abrupta caída de la densidad para hormigones constituidos con agregados calcáreos.

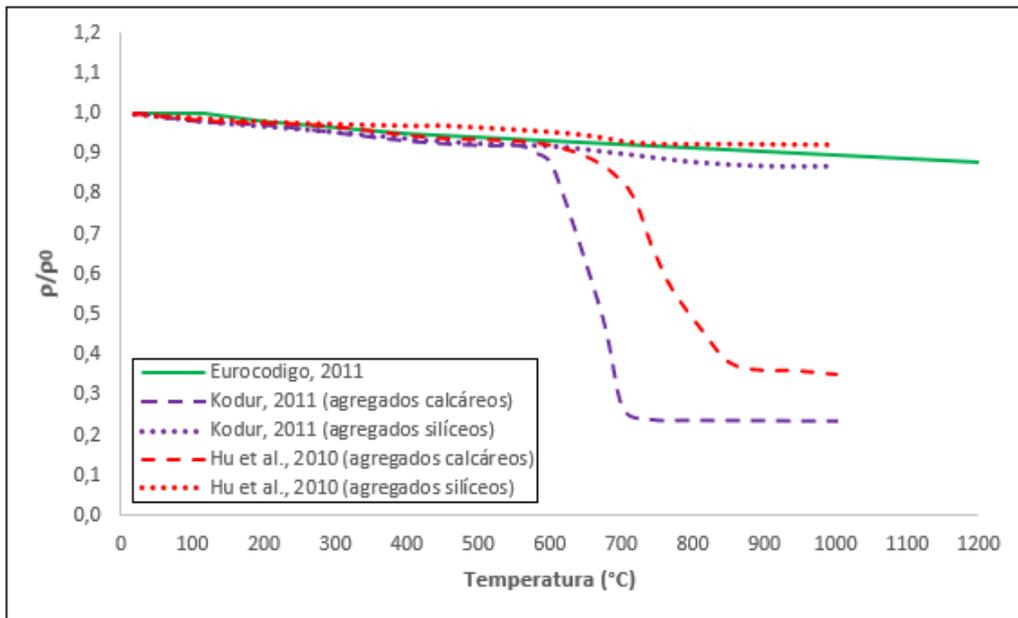


Figura 7- Evolución de la densidad del hormigón con la temperatura

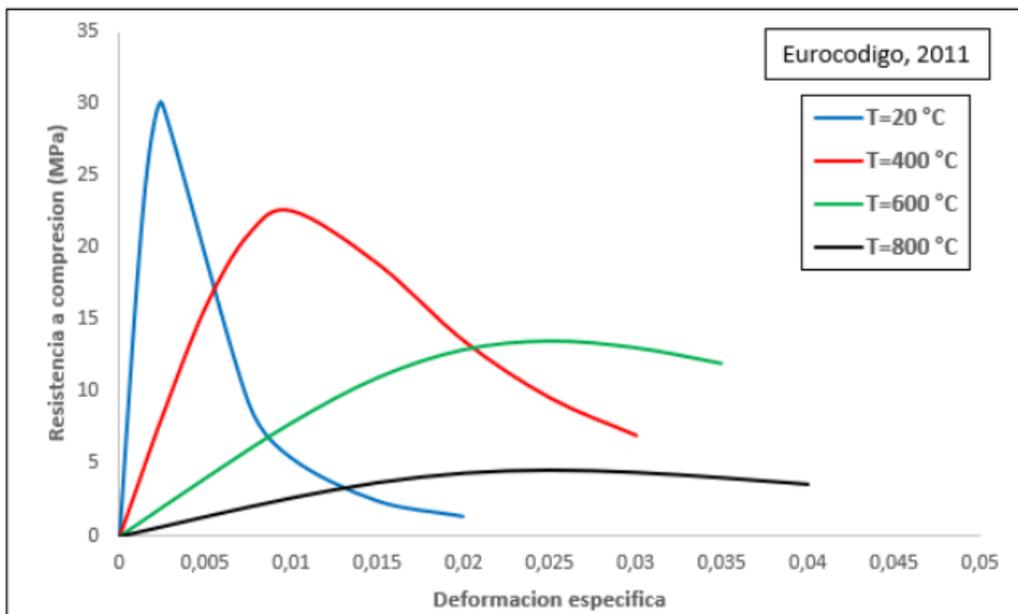


Figura 8- Curvas tensión – deformación p/diferentes temperaturas

3. ANÁLISIS NUMÉRICO

En este trabajo se analiza numéricamente el comportamiento de una columna de hormigón armado de sección cuadrada sometida a una carga de compresión axial y que sufre la acción de un incremento de temperatura en forma envolvente desde la superficie exterior desde los 20 °C hasta 600 °C. El análisis se realiza mediante software basado en el Método de los Elementos Finitos (FEAP - Finite Element Analysis Program versión 8.4). La configuración de la columna se modela mediante elementos finitos de barra con 6 grados de libertad por nodo, con una longitud libre entre apoyos de 2.60 m, articulada en sus extremos y sometida a una carga de servicio que provoca una tensión efectiva igual a un 60% de su capacidad de carga última a compresión uniaxial. El escenario de incendio se simula adoptando la distribución temporal de temperaturas propuesta en la norma ISO 834, ver Figura 9. El diagrama de flujo del análisis computacional se sintetiza en la Figura 10. El proceso ilustra los pasos de entrada de datos y el método empleado para resolver el acoplamiento entre el problema térmico y el problema mecánico.

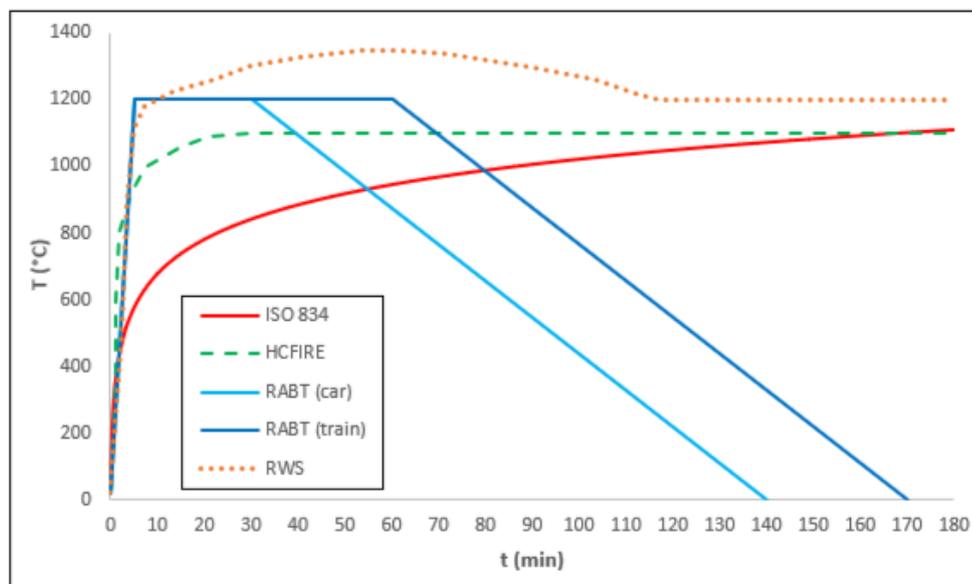


Figura 9: Curvas tensión – deformación p/diferentes temperaturas

3.1 Parámetros materiales y cargas de servicio

Las pruebas numéricas se realizaron con secciones de hormigón armado de $b \times b = 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ y con un recubrimiento de armaduras de 4.0 cm. La armadura de refuerzo se constituye de 8 barras longitudinales de diámetro 16 mm, con una tensión de fluencia de 4200 kg/cm^2 . Las resistencias de los hormigones ensayados variaron desde 28 MPa hasta 100 MPa. Ver Tabla 1.

Tabla 1- Cargas axiales y Resistencias características del material

Resistencia a la compresión (MPa)	28	60	100
Carga axial servicio (MN)	2.69	5.76	9.60

Para cada resistencia característica considerada se determinaron los correspondientes parámetros físicos y materiales de acuerdo a lo propuesto en la bibliografía de referencia, ver apartado 2. Según la temperatura y para cada tipo de hormigón se cuenta con un conjunto de datos de entrada para cada análisis numérico. En la figura 10 se ilustra la interfaz típica del software para el ingreso de parámetros materiales del hormigón y geométricos de la columna.

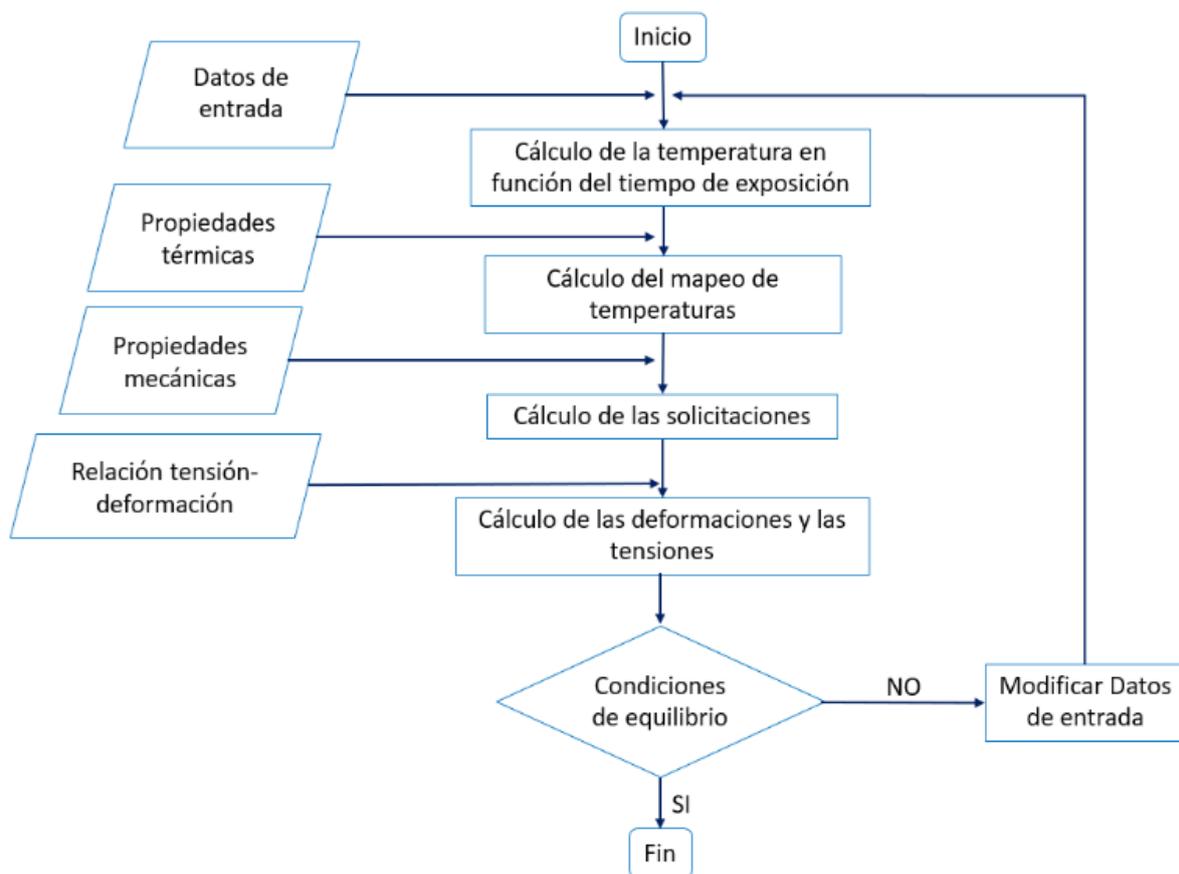


Figura 10 – Proceso computacional – problema termo mecánico acoplado

En Tablas 2, 3 y 4 se presentan los datos correspondientes a las resistencias del hormigón para resistencias características de 28, 60 y 100 MPa y para un rango de temperaturas de 20 °C y su degradación para temperaturas de 200 °C, 400 °C y 600 °C en función de las recomendaciones del EC2. Se considera que estas propiedades, para cada temperatura, son constantes en la sección, es decir que la temperatura es la misma en cada punto. De esta manera el análisis se realiza desde un punto de vista conservador que considera que la temperatura en la superficie exterior de la columna alcanza los mismos valores en el interior de la sección, lo cual queda del lado de la

seguridad al considerar una mayor superficie de la sección afectada por la reducción de resistencia y degradación de parámetros.

Tabla 2. Parámetros materiales para resistencia a la compresión 28 MPa

	Temperatura (°C)			
	20	200	400	600
Peso específico (N/m ³)	2,4E+4	2,33E+4	2,28E+4	2,26E+4
Módulo Elástico (GPa)	25,35	19,01	12,67	6,34
Coeficiente de Poisson	0,20	0,15	0,09	0,03
Coef. dilatación lineal (°C ⁻¹)	9,90E-06	9,90E-06	1,49E-05	1,98E-05
Resist. a compresión (Mpa)	28	27,6	23,90	16,87

Tabla 3. Parámetros materiales para resistencia a la compresión 60MPa

	Temperatura (°C)			
	20	200	400	600
Peso específico (N/m ³)	2,40E+4	2,33E+4	2,28E+4	1,98E+4
Módulo Elástico (GPa)	32,12	24,09	16,06	8,03
Coeficiente de Poisson	0,20	0,15	0,09	0,03
Coef. dilatación lineal (°C ⁻¹)	9,90E-06	9,90E-06	1,49E-05	1,98E-05
Resist. a compresión (MPa)	60	58	51	36

Tabla 4. Parámetros materiales para resistencia a la compresión 100 MPa

	Temperatura (°C)			
	20	200	400	600
Peso específico (N/m ³)	2,53E+4	2,38E+4	2,33E+4	2,30E+4
Módulo Elástico (GPa)	39,71	29,79	19,85	9,93
Coeficiente de Poisson	0,20	0,15	0,09	0,03
Coef. dilatación lineal (°C ⁻¹)	9,90E-06	9,90E-06	1,49E-05	1,98E-05
Resist. a compresión (MPa)	100	98	85	60

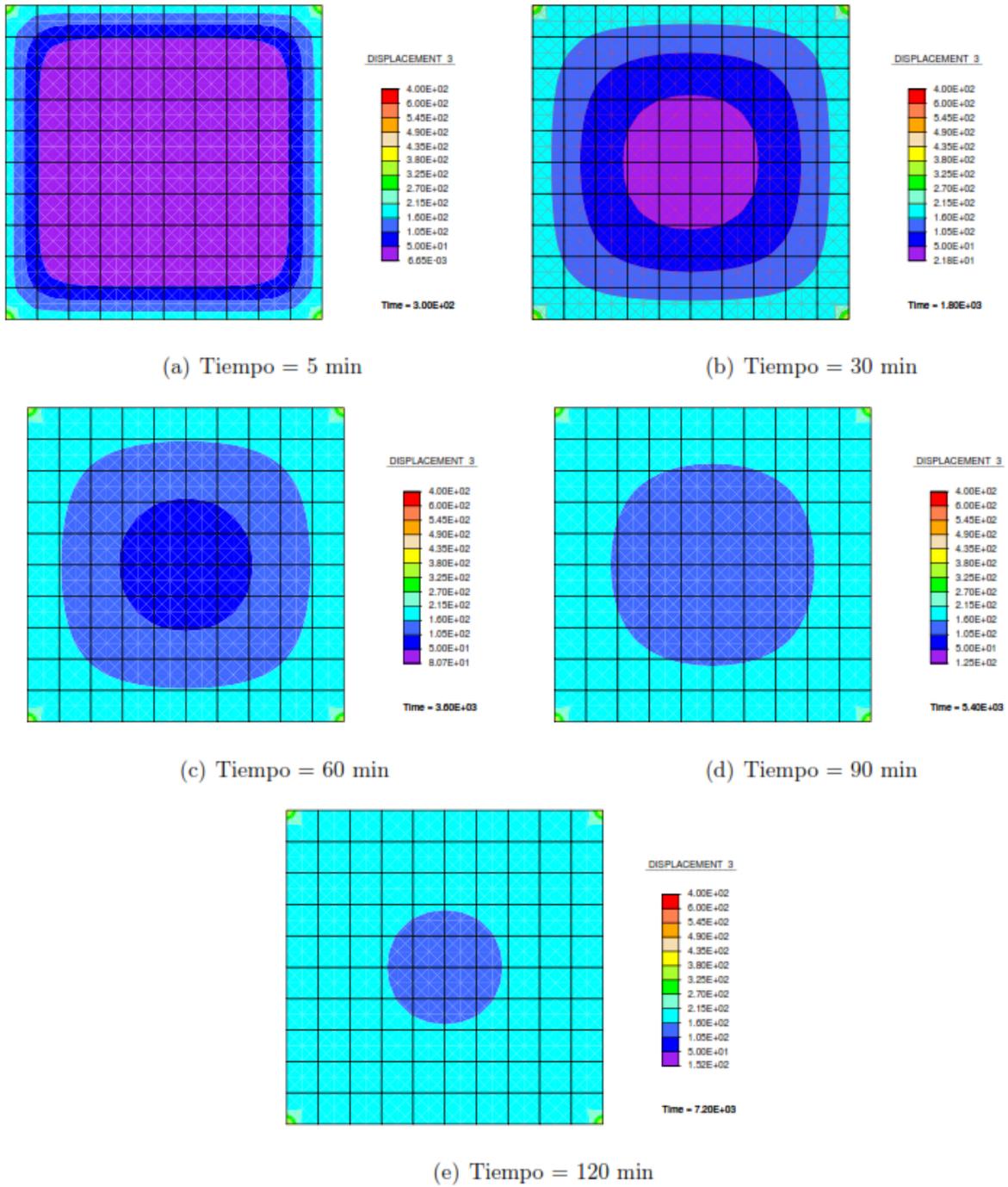


Figura 11: Proceso computacional – problema termo mecánico acoplado
 Distribución de temperaturas en función del tiempo (FEAP v8.4) – $T=200^{\circ}\text{C}$

3.2 Curvas de interacción

Las curvas de interacción para estado último bajo carga Axial-Momento flector (curvas Pu-Mu), se construyen en función de los parámetros del material, la sección de hormigón y la posición y cuantía de la armadura de refuerzo, obteniéndose la capacidad resistente bruta de la sección antes del colapso. En Figura 12 puede apreciarse la progresiva degradación de la capacidad resistente. Los datos de los sucesivos análisis se ilustran en las curvas ubicando la carga axial en ordenadas y los momentos flectores en abscisas.

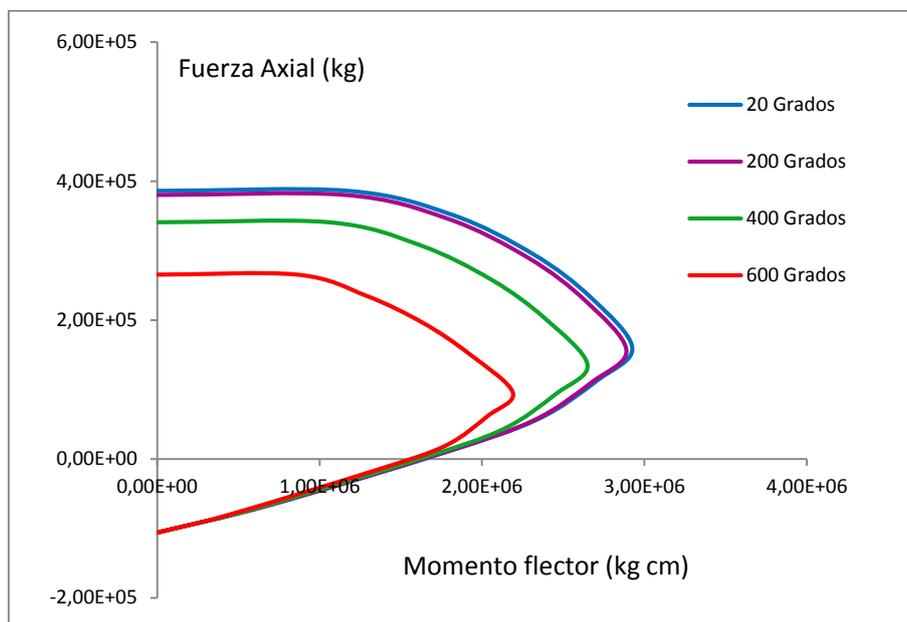


Figura 12: Curva de capacidad de carga de la sección (Hormigón 28 MPa)

La fuerza axial última en compresión pura que puede desarrollar la sección es de 385945 kg (3,86MN) muy superior a la carga aplicada. Con el aumento de temperatura y la reducción de los parámetros materiales las curvas muestran la degradación de la resistencia de la sección. A los 600° la carga axial se redujo a 265476,6kg (2,65MN), justo por debajo de la carga aplicada. Es decir que para temperaturas superiores a los 600°C el elemento estructural poseerá una resistencia bruta inferior a la sollicitación externa. La Figura 13 muestra las curvas de interacción para el hormigón de resistencia característica de 60 MPa con carga axial de 5,76 MN. A los 600 °C de temperatura la sección posee una capacidad de carga de 4,70 MN.

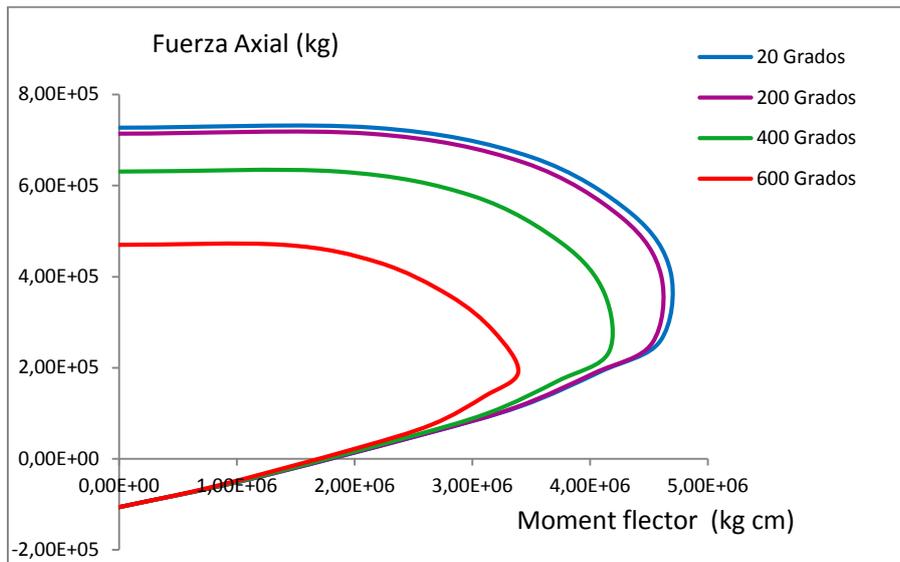


Figura 13: Curva de capacidad de carga de la sección (Hormigón 60 MPa)

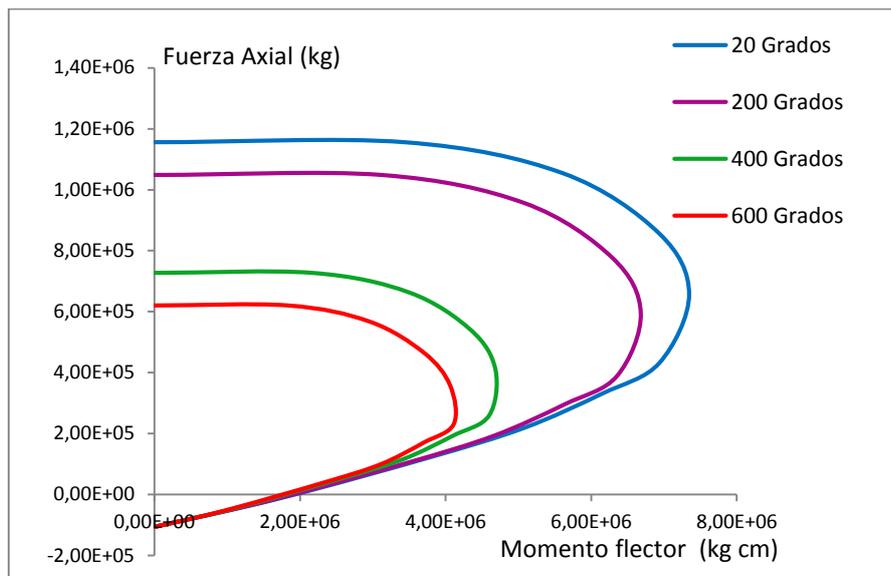


Figura 14: Curva de capacidad de carga de la sección (Hormigón 100 MPa)

Comportamiento similar se observa en la Figura 14 para el caso del Hormigón de resistencia característica de 100 MPa. Con una carga axial de 9,6 MN y una resistencia de 6,2 MN. El hormigón de 28 MPa a una temperatura de 600°C puede desarrollar una resistencia que soporte el 98% de la carga aplicada. En el caso del hormigón de 60 MPa esta resistencia se redujo al 82% para igual temperatura. En el caso de hormigones de resistencia característica de 100 MPa se acentúa aún más la pérdida de capacidad por degradación térmica al verse reducida su resistencia al 64%.

4. CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento mecánico del hormigón a altas temperaturas representa aun hoy un problema muy complejo, involucrando alto grado de acoplamiento entre la degradación de parámetros mecánicos por acción de la temperatura y la no linealidad propia de la constitución heterogénea de la masa del hormigón. Este problema se complejiza aún más si se considera la combinación del caso térmico extremo correspondiente a incendio con estados de carga reglamentarios indicados en los códigos de construcciones para los cuales la sección transversal se ve solicitada por esfuerzos axiales y de flexión simultáneos los cuales potencian el proceso de reducción de la capacidad portante que debe analizarse en cada caso en función de la geometría de la sección, cuantía de armadura de refuerzo, calidad del hormigón, estados de cargas, etc. siendo de primordial relevancia su consideración explícita en el diseño estructural de elementos de hormigón armado formados por hormigones de alta resistencia o elevadas prestaciones. Además de la reducción de capacidad portante directa de la sección producida por la elevada temperatura deben considerarse en el análisis la influencia de la esbeltez, cuantía, las condiciones de vínculo en planos principales y los distintos escenarios térmicos que puedan combinarse con los casos típicos de solicitaciones debidas a cargas externas convencionales. Los resultados obtenidos en este análisis simplificado resaltan la importancia del fenómeno, mostrando claramente que al aumentar la resistencia del hormigón la degradación es mayor, confirmando que los hormigones de mayor resistencia son más susceptibles a sufrir degradación térmica cuando son sometidos a temperaturas elevadas tales como las esperables en casos de incendio.

5. REFERENCIAS

- [1] EUROCODIGO 2: *Proyecto de Estructuras Sometidas al fuego. Normas Europeas EN1992-1-2:2004 y EN1992-1-:2004 / AC.2008.* Comité Europeo de Normalización. Madrid (2011).
- [2] BASTAMI, M. ASLANI, F. Y ESMAEILNIA, O. M.: High Temperatures Mechanical Properties of Concrete. *International Journal of Civil Engineering.* Vol. 8 (4). (2010).
- [3] KODUR, V.K.R. *Fire Performance of High-Strength Concrete Structural Members – Construction Technology Update N°31.* National Research Council of Canada. ISSN 1206-1220. (1999).
- [4] 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
- [5] MARECHAL, J. C.: "*Variations in the Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio with Temperature,*" SP-34, American Concrete Institute, Detroit, MI, (1972).
- [6] EUROCODIGO 1- *Acciones en estructuras- Parte 1-5 Acciones Térmicas. EN 1992-1-2:2004 y EN1992-1: 2004 / AC. 2008.* Comité Europeo de Normalización. Madrid.

- [7] R. DE BORST y PETERS P. *Analysis of concrete structures under thermal loading. Computers Methods in Mechanics Applied and Engineering* 77. Págs. 293-310. North Holland (1989).
- [8] RAUT NIKHIL. *Response of High Strength Concrete columns under fire Induced Biaxial Bending*. PhD. Thesis, Michigan State University (2011).
- [9] LEDESMA, M; LOREFICE R.; ETSE G: *Ensayos numérico-computacionales del proceso de fractura de hormigones de alta resistencia. ENIEF 2009. Mecánica Computacional, Vol. XXVIII, Págs. 2211-2255. Tandil Argentina, 2009.*
- [10] LOREFICE R.: *Modelación de la Respuesta Dinámica del Hormigón mediante los criterios Meso y Macromecánicos. Tesis Doctoral, CEMNCl - Universidad Nacional de Tucumán, (2007).*
- [11] B. LUCCIONI, M. FIGUEROA Y R. DANESI, *Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures*, Engineering Structures, Vol. 25, pp. 729-742, (2003).
- [12] LOREFICE R; ETSE G. *Viscoplastic Approach for Rate-Dependent Failure Analysis of Concrete Joints and Interfaces. International Journal of Solids and Structures*, 45 2686–2705, (2008).
- [13] 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.*
- [14] RIZO PATRON, M, LOREFICE R; PEREZ, G. (2016) *Análisis del Comportamiento Estructural de Columnas de Hormigón Armado a temperaturas Elevadas. XXIV Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (AIE). Buenos Aires, Argentina.*
- [15] RIZO PATRÓN, M., LEDESMA, M., NAVARRO, I. “*Criterios de Evaluación de Falla de Estructuras de Hormigón Sometidos a Temperaturas Elevadas*”. Congreso Argentino de Ingeniería CADI 2014, San Miguel de Tucumán, (2014). En CD ROM.
- [16] FEAP, Finite Element Analysis Program, R.L. Taylor, Berkeley University (2016). Version 8.4.
- [17] LOREFICE, R., ETSE, G., LOPEZ, C. y CAROL I.: *Mesomechanic Analysis of Time Dependent Concrete Behavior, EURO-C 2006, Computational Modeling of Concrete Structures, Mayrhofen, Austria,(2006).*
- [18] RIZO PATRON, M, LOREFICE R; PEREZ, G. (2017) *Modelo Constitutivo Macromecánico Para Hormigones a Altas Temperaturas. Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería (CMN 2017). Valencia, España,. Pags. 760 - 775.*