

## **EVALUACION ESTRUCTURAL DEL COMPORTAMIENTO DE HORMIGONES DE ALTA PERFORMANCE SOMETIDOS A TEMPERATURAS ELEVADAS**

**Myriam Marcela Ledesma**, Univ. Nac. de Santiago del Estero, mmledesma@unse.edu.ar

**Ricardo Horacio Lorefice**, Univ. Nac. de Santiago del Estero, rlorefice@gmail.com

**Rosa Alicia Kairuz**, Univ. Nac. de Santiago del Estero, rakairuz@hotmail.com

**Resumen**— El comportamiento estructural de los Hormigones de Alta Performance (HAP) depende de diversos factores relacionados con la composición de su mezcla, con sus propiedades mecánicas y de la naturaleza de las acciones a las que son sometidos cuando forman parte de elementos estructurales. Más aún si el hormigón estará sometido a un aumento de temperatura relevante, tal cual el asociado a casos de incendio, dicho material tiende a sufrir una reducción drástica de su capacidad portante de manera abrupta debido al fenómeno de descascaramiento explosivo, el cual lo vuelve mucho más frágil comparativamente que los hormigones normales. La evaluación de este comportamiento se realiza mediante el empleo de modelos numéricos que consideren la incidencia de cada parámetro en la degradación mecánica del material, y a la vez en la respuesta estructural del conjunto ante diversos escenarios de carga permanente combinados con la acción térmica.

**Palabras clave**—*Hormigones de alta performance, temperatura, modelación numérica.*

### **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 alta resistencia” en forma significativa. Si bien el término “resistencia” 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 afectado el comportamiento mecánico de estos hormigones 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. Las propiedades físicas, como densidad, conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, calor específico, de los materiales que lo constituyen, la geometría, como también la intensidad de la carga, las características del incendio en

sí mismo, la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, deformación máxima, módulo de elasticidad y deformación por fluencia lenta son factores que afectan el comportamiento del hormigón bajo esas acciones.

El comportamiento del hormigón y los efectos de las altas temperaturas sobre sus propiedades mecánicas ha sido investigado desde los años '40. Los resultados constituyeron la base para las recomendaciones técnicas y previsiones para establecer la resistencia del hormigón en varios códigos. Muchos de esos estudios fueron realizados sobre hormigones de resistencia normal y unos pocos sobre hormigones de alta resistencia. Actualmente aumentaron las pruebas de laboratorio y empíricas no sólo sobre su resistencia última sino también 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.

Desde el punto de vista numérico, las investigaciones tendientes al desarrollo de modelos computacionales capaces de predecir el comportamiento mecánico de este tipo de 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 alta resistencia bajo la acción de cargas combinado con un aumento de temperatura. Para ello se evalúan la incidencia de la temperatura en las propiedades físicas y mecánicas del material y su degradación para incorporar estas variables en un análisis computacional mediante la aplicación de software de uso estructural.

## **2 Propiedades físicas y mecánicas de los hormigones de alta performance sometidos a altas temperaturas.**

Los factores mencionados en el párrafo anterior inciden en el comportamiento de los hormigones de alta performance ante la ocurrencia de incendios y pueden observarse a nivel macroscópico en situaciones reales o mediante pruebas de laboratorio. Dado que la realización de pruebas a escala natural constituye un problema de muy alta complejidad y elevados costos, la modelación numérica del comportamiento del hormigón es una herramienta útil y apropiada a los fines de la búsqueda de una solución. El comportamiento no lineal del hormigón se modela mediante la degradación progresiva de sus parámetros mecánicos.

### **2.1 Coeficiente de dilatación lineal.**

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 debido a las restricciones, ver Figuras 1 y 2.

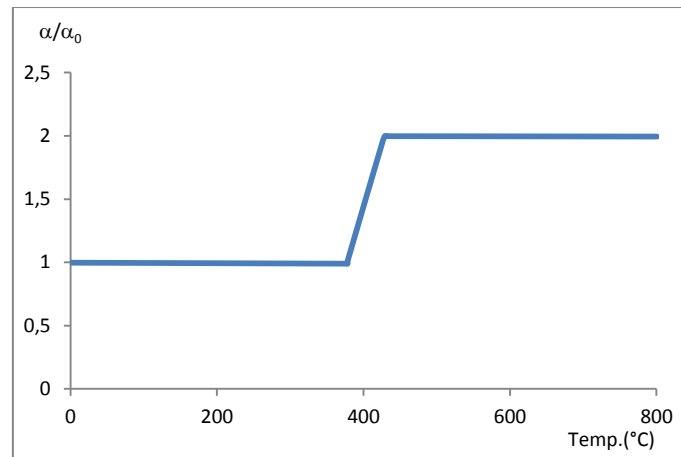


Figura 1. Variación del coeficiente de dilatación  $\alpha/\alpha_0$  (R. de Borst - P. Peters, 1989)

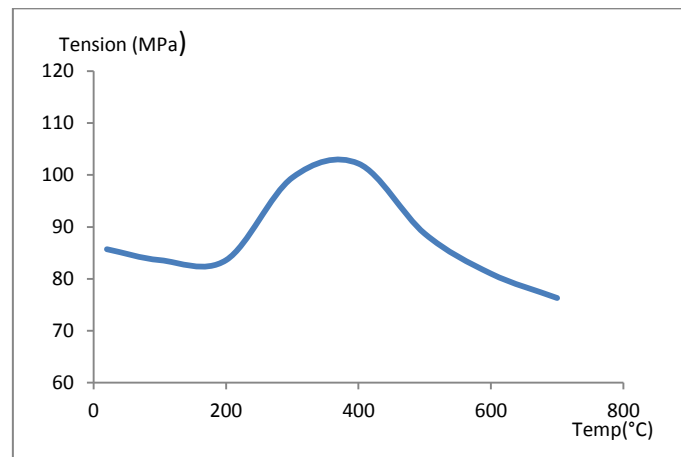


Figura 2. Tensión axial (MPa) en función de la temperatura para probetas restringidas superior e inferiormente.

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.

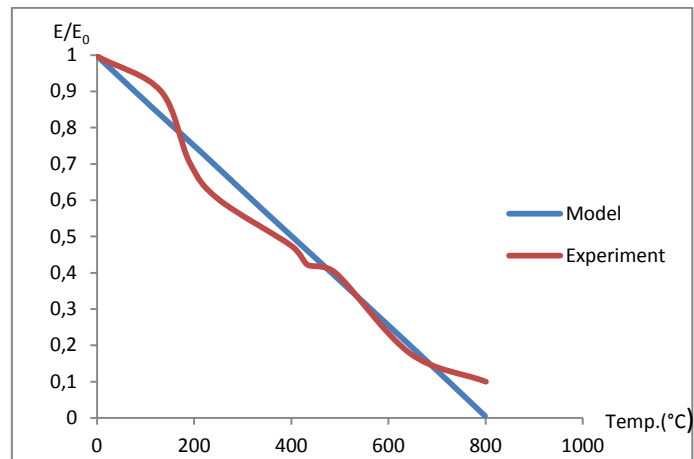


Figura 3. Dependencia del Módulo de Young con la temperatura ( $E/E_0$ ) (R. de Borst - P. Peters 1989)

### 2.3 Conductividad térmica

No se dispone de datos acerca de la variación de la conductividad térmica en HAP. Se presentan aquí comparaciones de códigos y predicciones para hormigones normales según Raut (2011)[2].

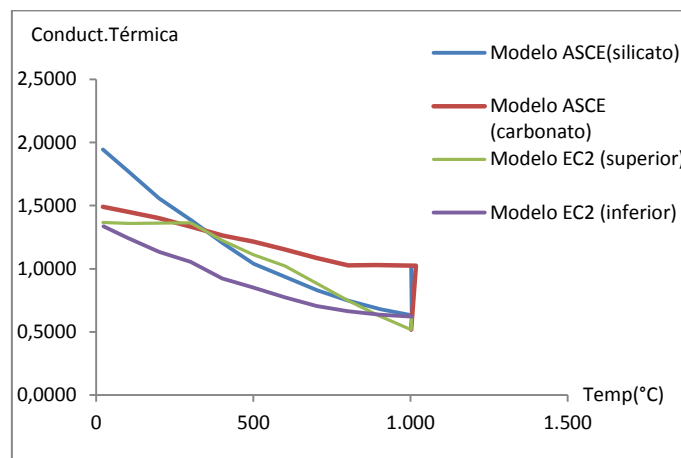


Figura 4. Variación de la conductividad térmica ( $W/m^{\circ}C$ ) para NSC (Raut 2011).

### 2.4 Resistencia a la compresión

Bastami et al (2009) [3] 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).

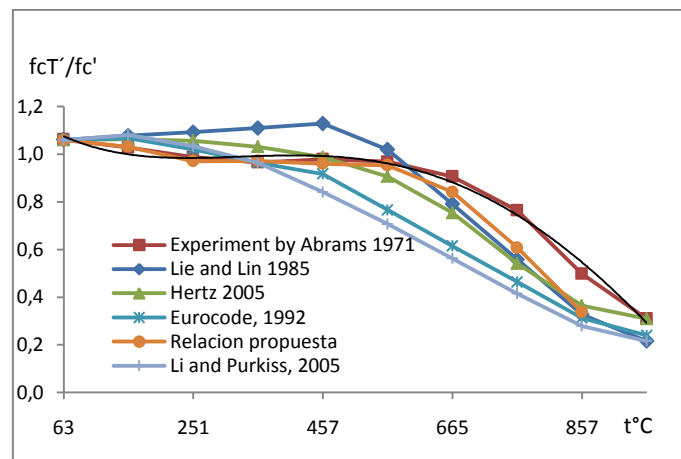


Figura 5. Resistencia a la compresión de muestras de hormigón a altas temperaturas, Bastami et al (2009)

## 2.5 Coeficiente de Poisson

Según los estudios experimentales de Marechal (1975) [4], el módulo de Poisson decrece linealmente con el aumento de la temperatura como lo muestra la Figura 6. El módulo de Poisson para un hormigón con áridos cuarzíticos reduce de 0.22 a temperatura ambiente a 0.10 a 400 °C. Esto se debe al ablandamiento de la microestructura resultante de la ruptura de las ligaduras debidas al calentamiento, Bazant y Kaplan (1996).

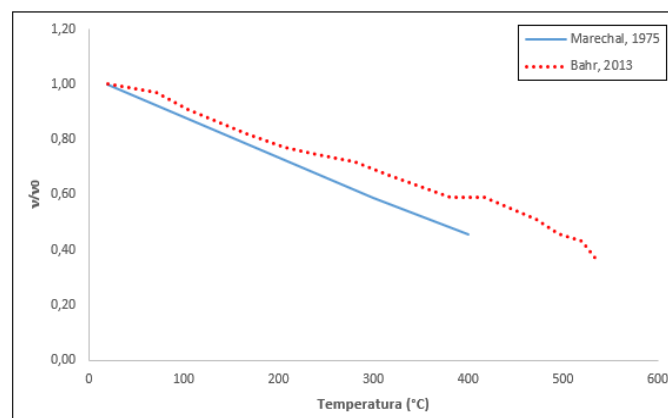


Figura 6: Evolución del coeficiente de Poisson del hormigón con la temperatura

## 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 7 la abrupta caída de la densidad para hormigones constituidos con agregados calcáreos [5] y [6].

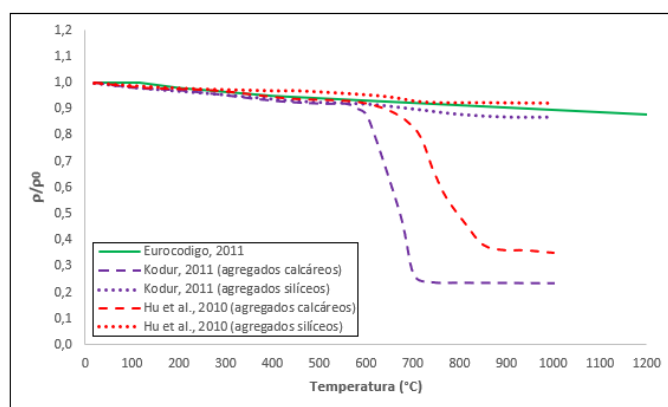


Figura 7- Evolución de la densidad del hormigón con la temperatura

### 3. Análisis computacional

En este trabajo consideramos 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  $^{\circ}\text{C}$  hasta 600  $^{\circ}\text{C}$ . El análisis se realiza mediante software basado en el Método de los Elementos Finitos [7]. La configuración geométrica de la columna se realiza mediante elementos finitos de barra con 6 grados de libertad por nodo, con una longitud libre entre apoyos de 2.40 m y articulada en sus extremos y sometida a una carga de servicio que provoca una tensión real de 60% de su capacidad de carga a compresión uniaxial.

#### 3.1 Parámetros materiales y cargas

Las pruebas numéricas se realizaron con secciones de hormigón armado de 40cmx40cm y con un recubrimiento de 4 cm. La armadura de refuerzo se constituye de 8 barras longitudinales de diámetro 16 mm, con una tensión de fluencia de 42MPa. 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

<b>Resistencia a la compresión (MPa)</b>	28	60	100
<b>Carga axial (MN)</b>	2.69	5.76	9.60

Para cada resistencia característica del material se determinaron los correspondientes parámetros físicos y materiales de acuerdo a lo propuesto por los autores mostrados en el 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 8 se muestra la interfaz del software para el ingreso de parámetros materiales del hormigón y geométricos de la columna.

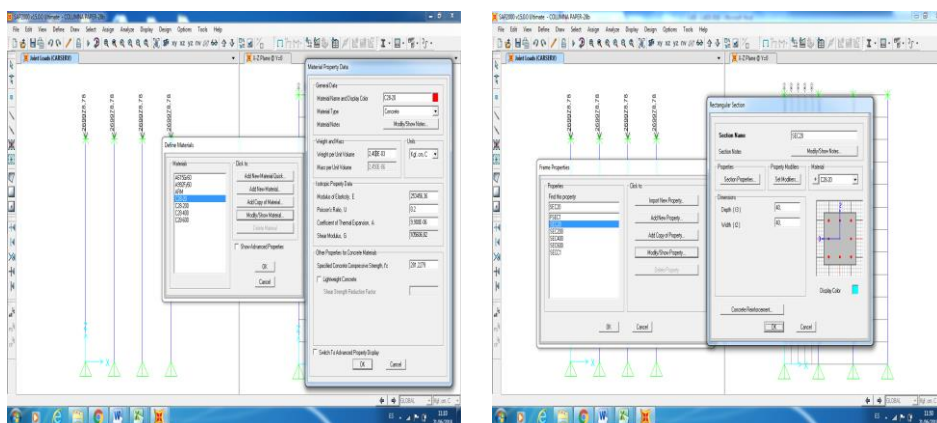


Figura 8 – Interfaz de ingreso - parámetros materiales (Resistencia 28MPa y 20°C)

En Tablas 2, 3 y 4 se presentan los datos correspondientes a las resistencias características de 28, 60 y 100 MPa y para un rango de temperaturas de 20°C y su degradación para 200 °C, 400 °C y 600 °C. 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 más conservador que considera que la temperatura en la superficie exterior de la columna alcanza los mismos valores que en el interior de la sección.

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

	Temperatura (°C)			
	20	200	400	600
Peso específico (N/m <sup>3</sup> )	2,4e+4	2,33e+4	2,28e+4	2,26e+4
Módulo Elástico (GPa)	25,35	19,01	12,67	6,34
Coefficiente de Poisson	0,20	0,15	0,09	0,03
Coefficiente de dilatación lineal (°C <sup>-1</sup> )	9,90E-06	9,90E-06	1,49E-05	1,98E-05
Resistencia a la 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 <sup>3</sup> )	2,40e+4	2,33e+4	2,28e+4	1,98e+4
Módulo Elástico (GPa)	32,12	24,09	16,06	8,03
Coefficiente de Poisson	0,20	0,15	0,09	0,03
Coefficiente de dilatación lineal (°C <sup>-1</sup> )	9,90E-06	9,90E-06	1,49E-05	1,98E-05
Resistencia a la 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 <sup>3</sup> )	2,53e+4	2,38e+4	2,33e+4	2,30e+4
Módulo Elástico (GPa)	39,71	29,79	19,85	9,93
Coefficiente de Poisson	0,20	0,15	0,09	0,03
Coefficiente de dilatación lineal (°C <sup>-1</sup> )	9,90E-06	9,90E-06	1,49E-05	1,98E-05
Resistencia a la compresión (MPa)	100	98	85	60

### 3.2 Curvas de interacción

Las curvas de interacción para estado último Carga axial-Momento flector (curvas Pu-Mu), se construyen en función de los parámetros del material, la sección de hormigón y la armadura de refuerzo, obteniéndose la capacidad resistente de la sección antes del colapso. En Figura 9 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. Estas curvas se construyen durante el proceso de calentamiento del elemento con la degradación del material puesta en manifiesto por el cambio de sus propiedades.



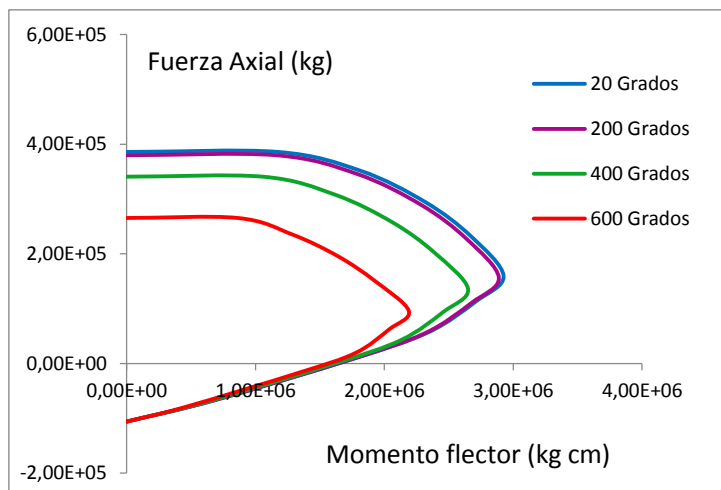


Figura 9 - Curva de capacidad de carga de la sección (Hormigón 28MPa)

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 inferior a la sollicitación externa. La figura 10 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 la sección tiene capacidad de 4,70 MN.

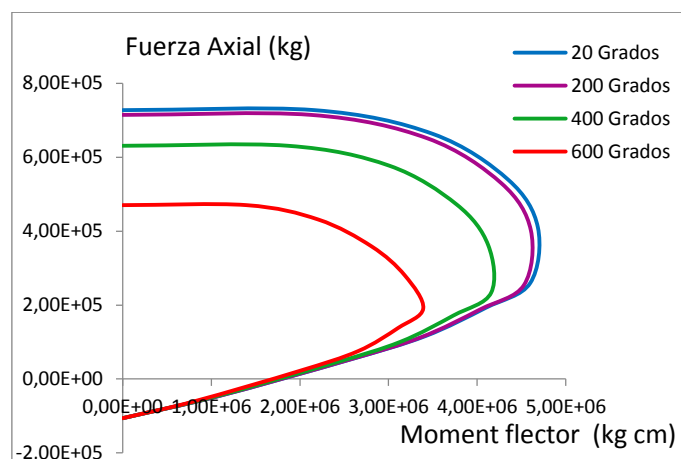


Figura 10: Curva de capacidad de carga de la sección (Hormigón 60 MPa)

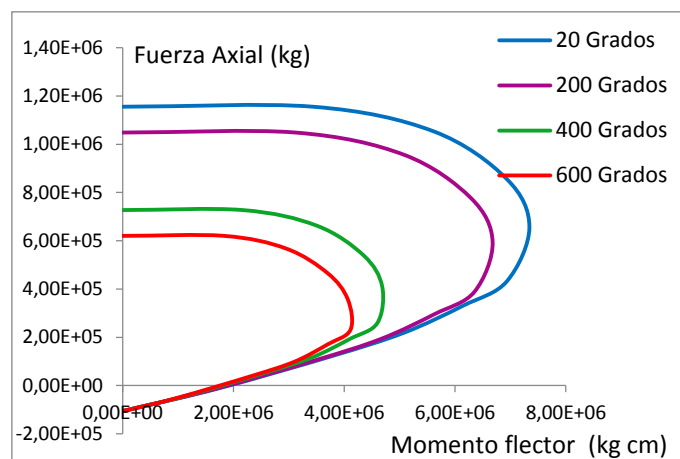


Figura 11: Curva de capacidad de carga de la sección (Hormigón 100 MPa)

Comportamiento similar se observa en la figura 11 para el caso del Hormigón de resistencia 100 MPa. Con una carga axial de 9,6 MN y una resistencia de 6,2 MN. El hormigón de 28MP a 600°C puede desarrollar una resistencia que soporte el 98% de la carga aplicada. En el caso del hormigón de 60MPa esta resistencia se redujo al 82% para igual temperatura. En el caso de hormigones de resistencia característica de 100 MPa se observa aún más la pérdida 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. La degradación de sus propiedades mecánicas combinadas con estados de carga que presentan axial y flexión simultáneos producen una reducción de la capacidad portante que debe analizarse en cada caso, y debe considerarse en el diseño estructural de elementos de hormigón armado, en particular si los mismos se construyen con hormigones de alta resistencia. Los resultados obtenidos indican la importancia del fenómeno, mostrando claramente que al aumentar la resistencia del hormigón la degradación es mayor. Los resultados confirman que los hormigones de alta resistencia son más susceptibles a los aumentos de temperatura, factor a tener en cuenta a la hora del diseño de estructuras de ingeniería que pudieran ocasionalmente encontrarse expuestas a las acciones de temperaturas elevadas.

Siguiendo la línea de investigación es aconsejable evaluar la influencia de la temperatura en las barras de refuerzo de la columna.

#### 5. Referencias

[1] R. DE BORST; PETERS P. *Analysis of concrete structures under thermal loading. Computers methods in mechanic applied and engineering* 77. Págs 293-310. North Holland. 1989.

[2] RAUT NIKHIL. *Response of High Strength Concrete columns under fire Induced Biaxial Bending*. PhD. Thesis, Michigan State University.2011

- [3] BASTAMI, M., CHABOKI-KHIABANI, A., BAGHBADRANI, M. AND KORDI, M. (2011) "*Performance of high strength concretes at elevated temperatures*", Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 1028-1036.
- [4] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION- *A Compilation of Elevated Temperature Concrete Material Property Data and Information for Use in Assessments of Nuclear Power Plant Reinforced Concrete Structures* – Octubre 2010
- [5] 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*
- [6] 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
- [7] CHANDRUPATLA, TIRUPATHI R., BELEGUNDU, ASHOK D. *Introduction to Finite Elements in Engineering*. Third Edition.
- [8] VAN HERBERHEN, P; VAN DAMME, M (1983) *Fire Resistance of Post-Tensioned Continuous Flat Floor Slabs with Unbounded Tendons, FIP*, pp. 3-11. 1983
- [9] BAILEY CG (2002). *Holistic behavior of concrete buildings in fire. Structures and Buildings* 152 (3): 199–212
- [10] 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-:2004/AC.2008*. Comité Europeo de Normalización. Madrid.
- [11] 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*
- [12] HUSEM, METIN (2006) *The effects of high temperature on compressive and flexural strength of ordinary and high performance concrete- Fire Safety Journal* March 2006. pgs 155-163
- [13] 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- :2004/AC.2008*. Comité Europeo de Normalización. Madrid.
- [14] 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.*
- [15] LOREFICE R.; (2007). *Modelación de la Respuesta Dinámica del Hormigón mediante los criterios Meso y Macromecánicos. Tesis Doctoral, CEMNCI - Univ. Nac. de Tucumán, 2007.*
- [16] 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,

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