

## ANÁLISIS DE ELEMENTOS COMPRIMIDOS DE HORMIGÓN ARMADO DE ALTA RESISTENCIA SOMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS

### ANALYSIS OF COMPRESSED ELEMENTS OF HIGH RESISTANCE REINFORCED CONCRETE SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURES

Myriam M. Ledesma<sup>a</sup> y Ricardo H. Lorefice<sup>a</sup>

<sup>a</sup>IMEC – INSTITUTO DE MATERIALES ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIONES, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Avda Belgrano 1912 Santiago del Estero, Argentina, [marcledesma67@gmail.com](mailto:marcledesma67@gmail.com), [rlorefice@gmail.com](mailto:rlorefice@gmail.com); <http://www.unse.edu.ar>

**Palabras clave:** Hormigón alta resistencia, temperatura, respuesta estructural.

**Resumen.** El comportamiento mecánico de los Hormigones de Alta Resistencia a la acción de temperaturas elevadas es aún un tema que presenta desafíos relevantes. El cemento, el agua, los agregados que lo componen, los aditivos que le proporcionan cualidades especiales y la armadura de refuerzo conforman una matriz de alta complejidad que incide en la respuesta estructural ante temperaturas elevadas. Los ensayos físicos sobre este tipo de material son difíciles de implementar, insumen mucho tiempo y altos costos. Por estas razones, la tendencia actual es la de realizar análisis computacionales que permitan representar la degradación de un elemento estructural de Hormigón de Alta Resistencia con barras de refuerzo y que tome en cuenta los cambios de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que lo componen mediante simulaciones numéricas ágiles, robustas y eficientes que provean una solución práctica para los diversos escenarios que involucren cargas convencionales combinados con acción térmica.

**Keywords:** High Resistance Concrete - temperature-structural response

**Abstract.** The mechanical behavior of High Resistance Concretes to the action of high temperatures is still a matter that raises questions. The cement, the water, the aggregates that compose it, the additives that provide it with special qualities, and if the reinforcing framework is considered, form a set that, when faced with the increase in temperature, its response is uncertain. Physical tests of this type are difficult to achieve and very expensive, so a computational analysis that allows us to represent the degradation of a High Resistance Concrete structural element with reinforcing bars and that takes into account the changes in the physical and mechanical properties of the materials that make it up providing a practical solution that also allows various load and thermal action scenarios to be considered.

## INTRODUCCIÓN

La demanda cada vez mayor de economía de espacio y resistencia impone la construcción de estructuras esbeltas y el uso de materiales de alta performance. A las acciones mecánicas convencionales consideradas en los códigos de construcciones hay que sumar las provocadas por el aumento de temperatura, tal el caso de un posible escenario de incendio, que implica la degradación del material afectando directamente el comportamiento mecánico de los elementos estructurales. En los hormigones de resistencia normal, el incremento de temperatura afecta a los materiales constitutivos de la mezcla produciendo una paulatina degradación interna. De acuerdo con diversos análisis de laboratorio, a partir de los 200°C la pasta cementicia inicia su pérdida de contenido de vapor de agua. Conforme aumenta el tiempo, el flujo de calor genera un aumento de temperatura, el cual por encima de los 200°C y hasta los 500°C provoca que los materiales que componen la pasta cementicia, como ser el hidróxido de calcio pierdan su resistencia mecánica. Superando esa temperatura, se inicia la degradación de los agregados gruesos y los cambios en el hormigón se vuelven irreversibles. Además, en el caso de los hormigones de alta resistencia, debido a su composición más densa, se produce un fenómeno de descascaramiento explosivo o ‘spalling’ relacionado con la presión de vapor del agua atrapada en el interior de la pasta, lo que incide directamente sobre la sección estructural del elemento, generando fragilidad en superficies paralelas a la superficie expuesta al flujo de calor. Hager I. (2003)

Si además se trata de hormigones con armadura de refuerzo, el comportamiento mecánico del elemento resulta aún más incierto debido al cambio en las propiedades mecánicas del acero con la temperatura. Es claro que el análisis de capacidad de carga de un elemento estructural compuesto de HAR y refuerzo de acero sometido a temperaturas elevadas es un problema de alta complejidad debido a la multiplicidad de factores que intervienen en el fenómeno y al acoplamiento existente entre los diversos procesos internos que ocurren en el seno de la matriz del material. En la actualidad el diseño de estructuras de hormigón armado que puedan estar sometidas a la acción de altas temperaturas y prolongada exposición a la acción del fuego se aborda en reglamentos internacionales que presentan distintas recomendaciones. En Argentina, el reglamento CIRSOC 201(2005) establece requisitos en los espesores de recubrimiento para proteger las estructuras de la acción de las altas temperaturas, como también dimensiones mínimas para los diferentes elementos estructurales. La norma recomienda también que estos espesores y dimensiones mínimas sean función del tiempo de exposición y del tipo de agregado que compone la mezcla. El EUROCODIGO2 (1992) organiza los criterios de diseño empleando según el caso, uso de tablas o ábacos, métodos de cálculo simplificados y métodos avanzados. Los métodos avanzados contemplan el estudio del fenómeno utilizando el análisis computacional que considere todos los factores que afectan la resistencia del hormigón durante un escenario de incendio. Partiendo de la base de que a temperatura ambiente el hormigón posee intrínsecamente un comportamiento no lineal bajo la acción de cargas, es claro que es de gran interés analizar la evolución de su capacidad de carga en función de la temperatura. Además de los métodos propuestos por los códigos existen, por ejemplo, investigaciones enfocadas en ajustar ecuaciones constitutivas con resultados de pruebas experimentales, F Aslani F. & Bastami M. (2011), o con un tratamiento tensorial por elementos finitos con el acoplamiento de deformaciones elásticas, plásticas, térmicas y creep como Gernay T., Millard A. y Franssen J.M. (2013), El Mohandes F. y Vecchio F. (2016) contrastan resultados obtenidos por las formulaciones del EUROCODIGO y ASCE con las obtenidas por la aplicación de un software de elementos finitos VECTOR3 que toma en cuenta las variaciones de las propiedades mecánicas del hormigón y del acero de las barras de refuerzo con la temperatura. Roudsari S. y Abu-Lebdeh T.M. (2019) contrastan resultados experimentales de columnas sometidas a una carga axial sometida a un aumento de

temperatura de 600°C con los obtenidos por el software que aplica elementos finitos ABAQUS.

Considerando lo indicado, en este trabajo se analiza la evolución de las diferentes propiedades del hormigón y acero con la temperatura, incorporando estos parámetros en simulaciones numéricas que permitan determinar la incidencia de cada una en la resistencia mecánica. La modelización se realiza considerando un elemento estructural sometido a una carga de compresión axial con armadura de refuerzo, constituido por hormigón de resistencia normal, incrementando la resistencia hasta alcanzar los valores característicos de hormigones de alta resistencia haciendo uso del software basado en elementos finitos SAP 2000 que permite incorporar la variación de las propiedades mecánicas del hormigón y el acero con la temperatura.

## 1 VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGON CON LA TEMPERATURA

Tanto el hormigón, como el acero varían sus propiedades mecánicas con la temperatura. El cambio de estos parámetros incide en la resistencia final y el proceso de degradación del elemento estructural expuesto a elevadas temperaturas. Esos valores obtenidos de códigos e investigaciones diversas sobre hormigones de resistencia normal, hormigones de alta resistencia y acero de refuerzo, suministran los parámetros con los que se realiza el análisis computacional.

### 1.1 Modulo elástico y coeficiente de dilatación

De Borst y 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. En la Figura 1 se muestra la variación del módulo elástico con la temperatura. Hasta los 150° la pasta cementicia se contrae por la pérdida de humedad, en cambio, los agregados comienzan a expandirse hacia los 400°C. En la Figura 2 se puede observar que el coeficiente de dilatación permanece constante hasta aproximadamente los 400°C y se duplica bruscamente entre los 400°C y los 450°C. Hasta los 150° la pasta cementicia se contrae por la pérdida de humedad, en cambio, los agregados comienzan a expandirse hacia los 400°C.

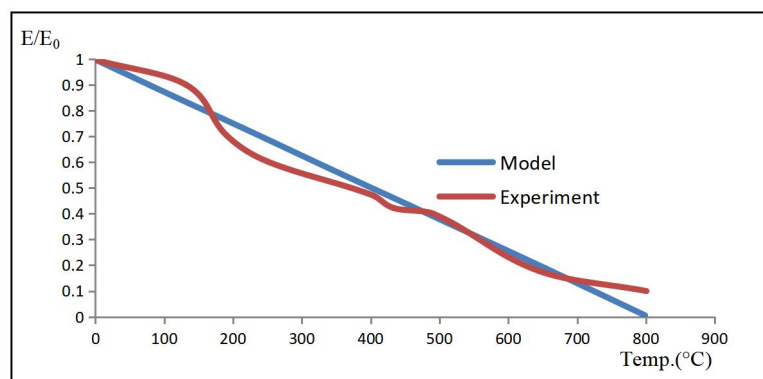


Figura 1: Módulo elástico vs temperatura - De Borst-Peters (1989)

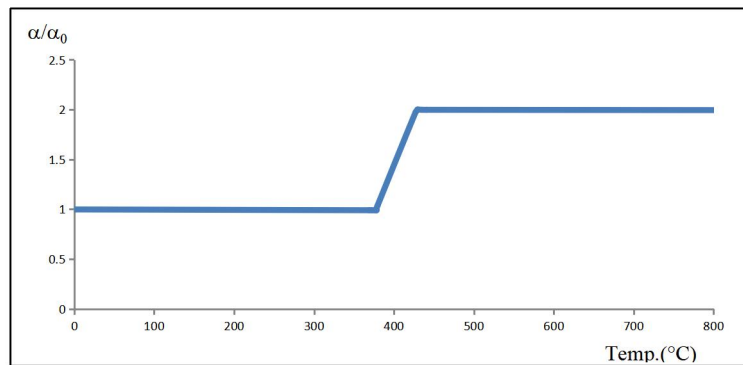


Figura 2: Variación del coeficiente de dilatación del hormigón con la temperatura- De Borst-Peters (1989)

### 1.2 Coeficiente de Poisson

El módulo de Poisson decrece linealmente con el aumento de la temperatura. 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).

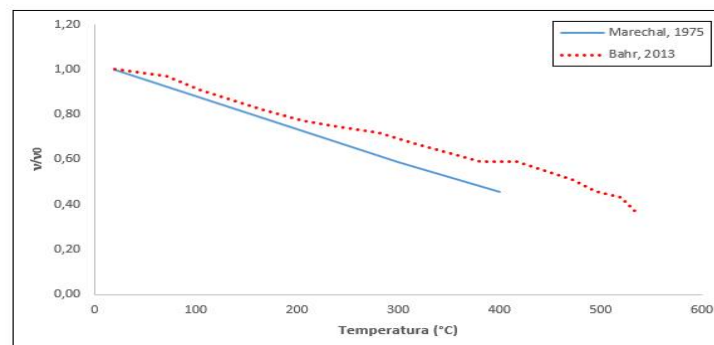


Figura 3: Cambio del coeficiente de Poisson con la temperatura

### 1.3 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. En la Figura 4 se pueden ver los resultados obtenidos al aplicar modelos propuestos por diversos autores y la relación propuesta por Bastami versus los resultados experimentales de Abrams (1971)

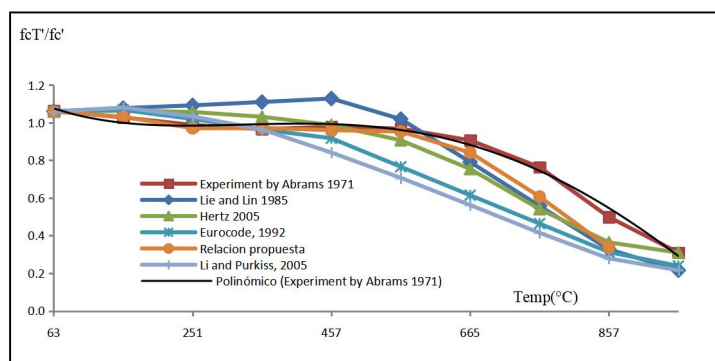


Figura 4: Resistencias a la compresión vs temperaturas para varios autores

## 1.4 Resistencia a la tracción

El EUROCODIGO2 presenta para el hormigón, un coeficiente de variación vs temperatura para la resistencia a la tracción del hormigón. La Figura 5 muestra, que a los 600°C aproximadamente, el hormigón ha perdido totalmente su resistencia a los esfuerzos de tracción.

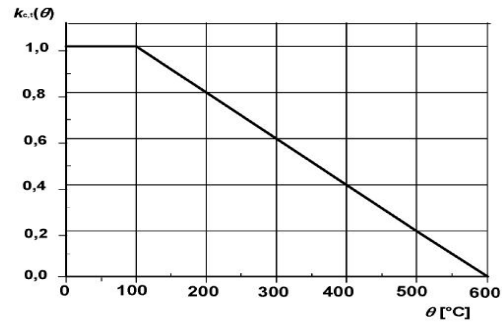


Figura 5: Coeficiente de reducción de resistencia a la tracción en el hormigón

## 1.5 Densidad

El hormigón tiene una gran cantidad de humedad en su constitución, y con el aumento de la temperatura experimenta una pérdida de masa como resultado de la evaporación de la humedad. Debido a la pérdida de agua, se reduce su masa y en consecuencia disminuye su densidad (ver Figura 6).

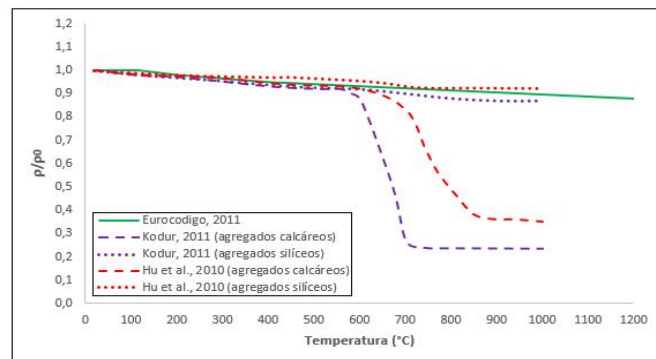


Figura 6: Densidad vs temperatura

## 2 PROPIEDADES DEL ACERO CON LA TEMPERATURA

En el caso del acero se consideró la variación del módulo elástico y la reducción de la resistencia con el aumento de la temperatura.

### 2.1 Módulo elástico

El EUROCODIGO 2 aconseja que al usar métodos de cálculo avanzados se proponga un análisis realista del comportamiento de la estructura en una situación de incendio. Para la relación tensión-deformación del acero en armaduras activas propone un modelo matemático cuyos parámetros se indican en la Figura 7 y cuyos valores se presentan en la Tabla 1.

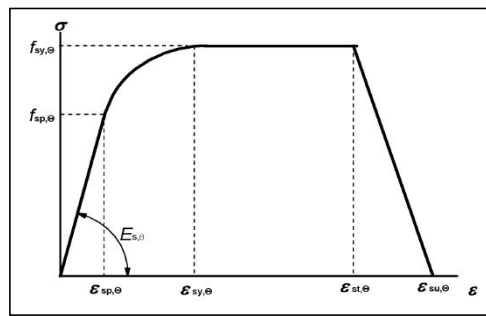


Figura 7: Parámetros relación tensión-deformación del acero- EUROCODIGO 2

La Tabla 1 muestra los parámetros de la Figura 7 tabulados para elevadas temperaturas en aceros de armaduras activas. De ella podemos obtener el módulo elástico y las reducciones de resistencia última y límite de proporcionalidad del acero para las temperaturas mostradas.

Temperatura del acero $\theta$ [°C]	$f_{ps,\theta} / (\beta f_{pk})$			$f_{ps,\theta} / (\beta f_{yk})$			$E_{ps} / E_p$		$\epsilon_{ps}$ [-]	$\epsilon_{su}$ [-]
	cw		q & t	cw	q & t	cw	q & t	cw, q & t	cw, q & t	
	Clase A	Clase B	3	4	5	6	7	8	9	
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.050	0.100
100	1.00	0.99	0.98	0.68	0.77	0.98	0.76	0.050	0.100	
200	0.87	0.87	0.92	0.51	0.62	0.95	0.61	0.050	0.100	
300	0.70	0.72	0.86	0.32	0.58	0.88	0.52	0.055	0.105	
400	0.50	0.46	0.69	0.13	0.52	0.81	0.41	0.060	0.110	
500	0.30	0.22	0.26	0.07	0.14	0.54	0.20	0.065	0.115	
600	0.14	0.10	0.21	0.05	0.11	0.41	0.15	0.070	0.120	
700	0.06	0.08	0.15	0.03	0.09	0.10	0.10	0.075	0.125	
800	0.04	0.05	0.09	0.02	0.06	0.07	0.06	0.080	0.130	
900	0.02	0.03	0.04	0.01	0.03	0.03	0.03	0.085	0.135	
1000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.090	0.140	
1100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.095	0.145	
1200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.100	0.150	

NOTA: Para valores intermedios de la temperatura se pueden hacer interpolaciones lineales.

Tabla 1- Valores de parámetros para la relación tensión-deformación- EUROCODIGO 2

### 2.2 Resistencia característica del acero con la temperatura

También el EUROCODIGO2 presenta valores del coeficiente de reducción de la resistencia característica del acero para armaduras activas y pasivas. Estos coeficientes pueden ser aplicados en los métodos simplificados de cálculo para estructuras sometidas a saltos térmicos. Se observa que para temperaturas de 600°C el acero ha perdido en promedio el 80% de su resistencia.

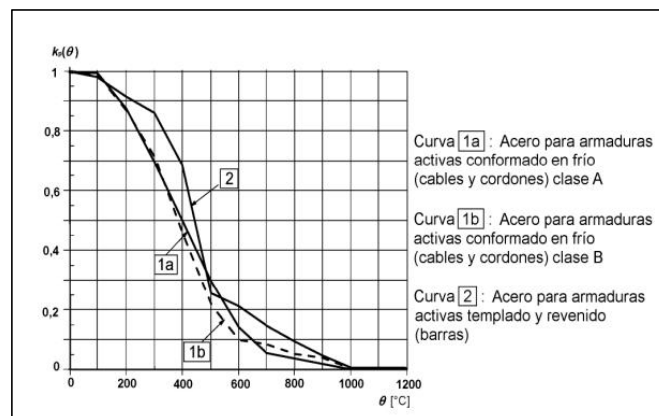


Figura 8: Coeficiente de reducción de la resistencia característica del acero

### 3 ANALISIS COMPUTACIONAL

El análisis computacional se enfoca en el comportamiento mecánico de un elemento estructural esbelto (columna) con parámetros de resistencia que varían entre las características de un hormigón de resistencia normal y los de alta resistencia. En todos los casos este elemento será sometido a un esfuerzo de compresión originado por una carga puntual axial. Esta carga de servicio axial provoca una tensión del 60% de la capacidad de carga a compresión. El análisis computacional se efectúa con un software que aplica el método de elementos finitos (SAP 2000 v20, con licencia adquirida por la UNSE). El mismo permite introducir cambios en los parámetros materiales, tanto del hormigón como del acero, es decir que para cada tipo de hormigón y cada temperatura es posible modelar la degradación del elemento y obtener en cada caso las cargas y momentos últimos de la sección, incluyendo análisis no lineal tanto por imperfecciones geométricas y por comportamiento material. SAP 2000 posee una interface avanzada de interoperatividad y compatibilidad con otros programas de cálculo, en particular con los programas FEAP V8 (R. Taylor, Universidad de California, Berkeley) y DRAC (Carol et al., UPC - Barcelona) que funcionan en entorno Fortran 90, y que constituyen la base sobre la cual se desarrollaron originalmente las mallas y modelos constitutivos originales para el análisis termo-elasto plástico. Una vez calibrados los modelos en los entornos de DRAC / FEAP V8, las curvas típicas de los mismos pueden emplearse en el entorno SAP 2000 para el análisis de problemas reales de estructuras o secciones sometidas a altas temperaturas dada su versatilidad para el empleo de diversos elementos finitos en el mismo modelo (barras / placas / elementos de solido), incluyendo estructuras mixtas o de hormigón simple, armado / pretensado, destacándose su eficiencia a la hora de realizar el procesamiento numérico, contando con la implementación de algoritmos modernos para el cálculo en computadores de 32 o 64 bits. Este software se emplea para analizar la sección estructural de una columna de 40cmx40cm con 4cm de recubrimiento y una longitud entre apoyos de 240 cm. La modelación numérica se realizará para 3 valores de resistencia del hormigón 28 MPa, 60 Mpa y 100 Mpa (Tabla 2).

Para lograr una comparativa sobre la incidencia de la temperatura en la resistencia final de la sección con armadura de refuerzo, las pruebas se modelan con y sin barras de acero activas. Las temperaturas van desde los 20°C, 200°C, 400°C y 600°C que es la temperatura en que el hormigón pierde casi el 60% de su resistencia con agregados calcáreos y 100% de su resistencia a la tracción.

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

Tabla 2: Resistencia del hormigón y carga de servicio

#### 3.1 Interfaz y carga de parámetros

El software permite tanto el diseño geométrico de piezas estructurales simples como de gran complejidad. De gran versatilidad para la carga de materiales, secciones y solicitaciones. Como ejemplo se muestra en la Figura 9 la interfaz en la cual se cargan los datos de la sección de la columna y los parámetros materiales del hormigón y del acero de las barras longitudinales y estribos.

La modelación computacional se realiza en estado full 3D, siendo posible la determinación de las capacidades de carga últimas  $F_u$  (carga última) y  $M_u$  (momento último) de las secciones luego de alcanzar su máxima degradación.

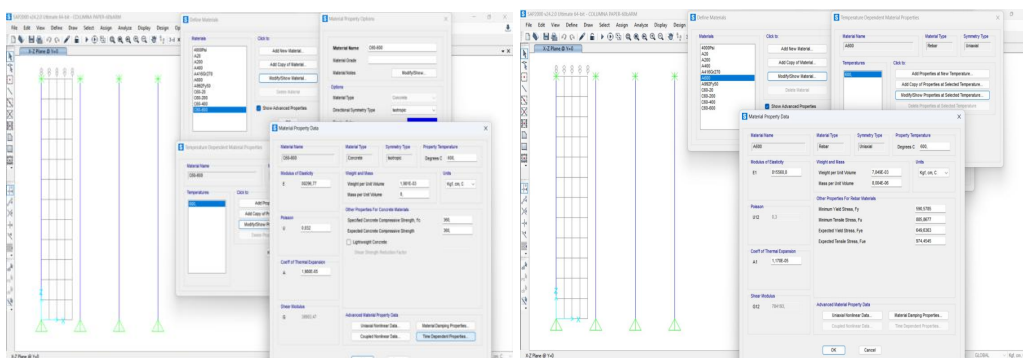


Figura 9: Interfaz de ingreso parámetros materiales hormigón y acero

### 4 RESULTADOS

Luego de realizadas las pruebas numéricas para los 3 valores de resistencia del hormigón y para 4 valores de temperatura, incluyendo en las simulaciones la incidencia de las variaciones de propiedades de los materiales, se construyen las curvas de interacción para el estado último Carga axial-Momento flector (plano Fu-Mu) en base a los parámetros de la sección de hormigón y su armadura de refuerzo obteniéndose la capacidad resistente del elemento previa al colapso. Los datos de los análisis se ilustran en las curvas siguientes. En Figura 10 puede observarse cómo se reducen los valores de Fu y Mu con el aumento de la temperatura en el caso de un hormigón de resistencia característica 28 MPa. La fuerza axial que puede desarrollar la sección a los 200°C es 3.80 MN sin armadura de refuerzo (línea llena) y 3.69 MN con armadura de refuerzo (línea punteada). Conforme aumenta la temperatura se observa la reducción en la capacidad portante de la sección. Al alcanzar la temperatura de 600°C la fuerza axial que es capaz de desarrollar la sección es de 2.65 MN sin refuerzo y 1.95 MN con armadura de refuerzo.

Es evidente la pérdida de capacidad portante del elemento debido al aumento de temperatura, reflejada en una degradación de la sección y sus propiedades mecánicas. Más notable aún es el efecto de la presencia de la armadura de acero, que contrariamente a lo que se podía suponer, no colabora ante la pérdida de resistencia del hormigón, dado que se encuentra más afectado en sus propiedades por el mismo aumento de la temperatura.

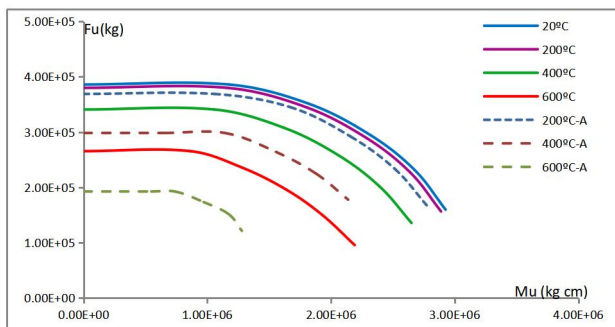


Figura 10: Capacidad de carga de la sección con y sin refuerzo - (28 MPa)

La Figura 11 muestra las curvas de interacción para un hormigón de resistencia característica 60 MPa. En este caso, estamos en presencia de un HAR y sus propiedades mecánicas se degradan con la temperatura, las curvas de respuesta para una misma temperatura se encuentran más próximas, dado que la capacidad resistente del hormigón de alta resistencia reside en mayor parte en la interfase pasta-agregado, y la presencia del refuerzo posee menor incidencia. La capacidad portante en estado último es de 4.70 MN sin



refuerzo y 3.97 MN con refuerzo, es decir desarrolla una capacidad portante del 81% y 68%.

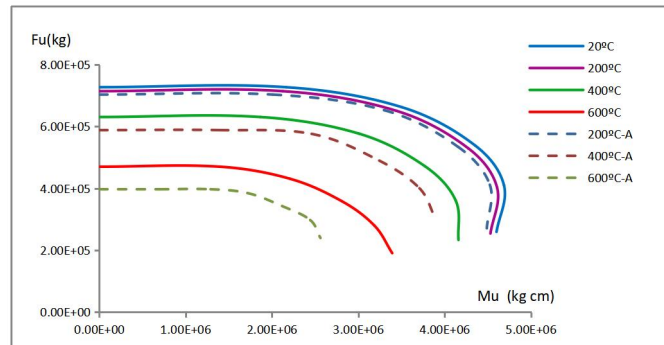


Figura 11: Capacidad de carga de la sección con y sin refuerzo - (60MPa)

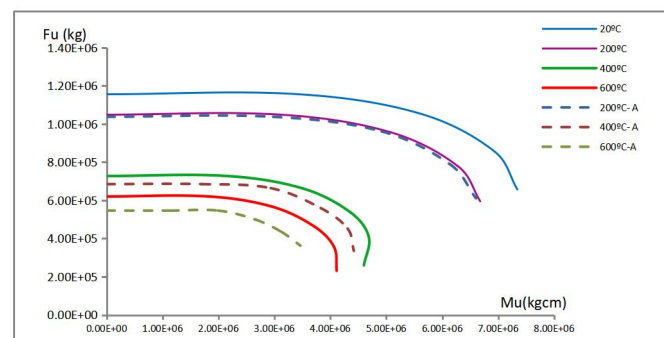


Figura 12: Capacidad de carga de la sección con y sin refuerzo - (100MPa)

Es claro que, en el caso de los HAR, la pérdida en capacidad portante de la sección con y sin refuerzo presentan menor diferencia que casos previos de análisis. En el caso del hormigón de 100 MPa, Figura 12, se repite la pérdida de capacidad portante por debajo del 65% a los 600°C de temperatura con una reducción del 57% en el caso de tener armadura de refuerzo. Para una carga axial de 9.80 MN, y para la mayor temperatura se obtiene una capacidad portante de 6.20 MN y 5.46 MN con presencia de armadura de refuerzo. Esto puede deberse a que cerca de los 600°C el acero pierde la mayor parte de su resistencia, mucho antes que el hormigón. Las restantes simulaciones ilustran la diferencia de respuesta en relación a la presencia de armadura de refuerzo.

## 5 CONCLUSIONES

Las simulaciones numéricas realizadas permiten captar el acoplamiento en las variaciones de los parámetros materiales de los componentes y su incidencia en el comportamiento del hormigón al incrementar la temperatura. Claramente la resistencia se reduce con el aumento de la temperatura produciendo una degradación de la capacidad portante. El esfuerzo axial último que puede desarrollar la sección degradada recién comienza a resultar insuficiente cerca de los 600°C en el caso del hormigón de resistencia Normal. En estos hormigones, la armadura de refuerzo no aporta mayor resistencia adicional con el aumento de temperatura sino al contrario. En el caso de los HAR, a temperaturas de 600°C los mismos han perdido gran parte de su capacidad portante y la pérdida se incrementa aún más cuanto mayor es la resistencia de diseño del hormigón. Además, la armadura de refuerzo no aporta resistencia significativa bajo la acción de las temperaturas elevadas. La diferencia es menor cuánto mayor es la resistencia del hormigón. Se puede concluir que los HAR tiene una respuesta altamente impredecible en relación a la acción de grandes saltos térmicos, motivo por el cual

deben tomarse recaudos en el diseño estructural para evitar que estos elementos estructurales se encuentren expuestos a la acción de temperaturas elevadas.

## REFERENCIAS

- Aslani F., Bastami M., Constitutive Relationships for Normal and High Strength Concrete at Elevated Temperatures. *ACI Materials Journal*, pp355-364, 2011
- Bailey, Cg., Holistic behavior of concrete buildings in fire. *Structures and Buildings* 152, 3: 199–212, 2002
- Bastami M., Chaboki-Khiabani, A., Baghbadrani, M., And Kordi, M., Performance of high strength concretes at elevated temperatures, *Scientia Iranica. Transaction A, Civil Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp1028-1036, 2011
- Bažant, Z., and Kaplan, M., Concrete at high temperatures, *Longman-Addison-Wesley, London*, 1996
- Bisby, L., Mostafaei H., Pimienta, P., State-of-the-Art on Fire Resistance of Concrete Structure Structure-Fire Model Validation. *Applied Research Associates*, 2014
- De Borst, R., Peters, P., Analysis of concrete structures under thermal loading. *Computers methods in mechanic applied and engineering*, 77: 293-310, 1989.
- El Mohandes, F., Vecchio, F., Reliability of Temperature-Dependent Models for Analysis of Reinforced Concrete Members Subjected to Fire. *ACI Structural Journal/May-June 2016*
- EUROCODIGO 2 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*. 2011
- 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*.
- Gernay T., Millard A., Franssen J.M. A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation: Theoretical formulation. *International Journal of Solids and Structures*-3659-3673, 2013
- Hager, I., Behaviour of cement concrete at high temperature *Bulletin of the polish academy of sciences-Technical sciences*, Vol. 61, No. 1, pp 145-154, 2013
- Husem., Metin., The effects of high temperature on compressive and flexural strength of ordinary and high performance concrete- *Fire Safety Journal March*2006. 155-163,2006
- Kodur, Vkr., Garlok, Mem., Structures in fire: state of the art, research and training needs. *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD, USA, 2007.
- Kodur., V.,K., Fire Performance of High-Strength Concrete Structural Members— *Construction Technology Update N°31*. National Research Council of Canada. ISSN 1206-1220, 1999
- Ledesma, M., Lorefice, R., Etse, G., Ensayos numérico-computacionales del proceso de fractura de hormigones de alta resistencia. *ENIEF 2009. Mecánica Computacional*, Vol. XXVIII, 2211-2255. 2009.
- Lorefice R., Modelación de la Respuesta Dinámica del Hormigón mediante los criterios Meso y Macromecánicos. *Tesis Doctoral, CEMNCI - Univ. Nac. de Tucumán*, 2007.
- Raut, Nikhil., Response of High Strength Concrete columns under fire Induced Biaxial Bending. *PhD. Thesis, Michigan State University*.2011
- Roudsari, S., Abu-Lebdeh, T., Evaluation of Fire Effects on Reinforced Concrete Columns Using Finite Element Method *American Journal of Engineering and Applied Sciences* , 12, pp. 227.235. 2019