

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN PROBETAS DE HORMIGÓN SOMETIDAS A ACCIONES TÉRMICAS

María Inés Montanaro*, María H Peralta* y Angel Di Maio †

* (1) Docentes investigadores Area Estructuras. Depto. Ingeniería Civil. Fac. de Ingeniería UNCPBA.
Avda Del Valle 5737. (7400) Olavarría. Argentina . TE: 54-(0284)-451055–Interno 274
e-mail: mmontana@fio.unicen.edu.ar

† Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT). Calle
52 e/121 y 122 (1900) La Plata. Buenos Aires. Argentina

Palabras clave: Hormigón, altas temperaturas, perfil térmico.

Resumen: *Las estructuras de hormigón pueden estar expuestas durante su vida útil a diferentes tipos de acciones, siendo la acción térmica de importancia en los casos de estructuras de edificios industriales, o en aquellas afectadas por incendios. Estas situaciones producen variaciones en las características mecánicas del material cuya magnitud dependerá, entre otras causas, de las temperaturas máximas alcanzadas y de la distribución de las mismas en la masa del elemento en análisis. Desde el punto de vista del comportamiento estructural el cambio de temperatura es la causa principal de las deformaciones de tracción en la masa del hormigón. La predicción de tales deformaciones requiere del conocimiento del perfil de las temperaturas a que estará sometido el elemento en estudio.*

En el presente trabajo se utiliza el Método de los Elementos Finitos para predecir la distribución de temperaturas en muestras de hormigón expuestas a diferentes niveles de calentamientos y tiempos de exposición. Los modelos numéricos se calibran en base a los resultados experimentales obtenidos en estudios de laboratorio realizados en probetas de hormigón expuestas a temperatura en horno durante diferentes tiempos de exposición.

1 INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material compuesto, el cual en su estado endurecido y bajo la influencia de temperaturas elevadas, experimenta comportamientos que se encuentran influenciados, fundamentalmente por la composición de la matriz y el tipo mineralógico del agregado grueso. Este comportamiento está gobernado en parte por la conductividad térmica, que es una propiedad que depende del tipo de material. Las altas temperaturas producen en el hormigón cambios químicos y físicos, causados en el caso de los primeros principalmente por el fenómeno de deshidratación de la pasta cementícea. Las alteraciones relacionadas con los fenómenos físicos se deben a las distintas variaciones volumétricas que tienen los agregados respecto de la pasta de cemento, hecho que provoca la fisuración interna del material.

La conductividad térmica k proporciona una medida del flujo de calor transmitido a través de una unidad de área del material bajo un gradiente de temperatura unitario. La conductividad térmica del hormigón está influenciada fundamentalmente por las características mineralógicas del agregado y por la dosificación, densidad y temperatura del hormigón.(1) En la tabla 1 se transcriben los valores de conductividad térmica (medida en energía/longitud tiempo temperatura) del hormigón para diferentes tipos de agregados.

Tabla 1: Coeficientes de conductividad térmica k .

Tipo de agregado	k (J/seg. m °C)
Cuarcítico	3.5
Dolomita	3.2
Granito	2.6-2.7
Basalto	1.9-2.2

El otro parámetro que también caracteriza la respuesta térmica de los materiales es el calor específico que se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa del material en un grado. El calor específico del hormigón no es un parámetro que esté afectado por el tipo de agregado, temperatura u otros parámetros a diferencia de la conductividad térmica.

El problema que se analizará en el presente trabajo se encuadra en los casos de transferencia de calor por convección, en los que interviene el coeficiente de transferencia de calor por convección h . Este coeficiente a diferencia de k , no es una propiedad del material ya que es un coeficiente que depende fundamentalmente de las condiciones fluidodinámicas, por lo que hay que evaluarlo a través de correlaciones empíricas, que a su vez tienen en cuenta el tipo de flujo (laminar o turbulento, según el número de Reynolds), geometría del sistema y si se trata de flujo interno o externo, etc.

La complejidad de la mayoría de los casos en los que interviene la transferencia de calor por convección hace imposible un análisis exacto, debiéndose utilizar correlaciones, para encontrar los parámetros que caracterizan el comportamiento, utilizando datos experimentales para la resolución de los problemas que se quieran abordar. (2)

En la bibliografía existe un número importante de estudios de laboratorio tendientes a evaluar el comportamiento de hormigones de diferentes características tecnológicas cuando son sometidos a altas temperaturas. En la mayoría de ellos se trata de cuantificar la pérdida de resistencia cuando son expuestos a distintas temperaturas máximas, tiempos, tipos de enfriamientos, etc., como así también cuantificar otras propiedades como la velocidad ultrasónica, módulo dinámico, etc.

Para poder estimar las probables deformaciones es necesario predecir el perfil de temperaturas esperado. En tal sentido el método de los elementos finitos puede ser utilizado para obtener dicho perfil térmico en la masa de hormigón.(3)

En el presente trabajo se utiliza el Método de los Elementos Finitos para predecir la distribución de temperaturas en probetas de hormigón expuestas a diferentes niveles de calentamiento y tiempos de exposición.

2 MODELOS ANALIZADOS

El presente análisis se realizó sobre modelos que representan un cuarto de la probeta cilíndrica utilizando en la simulación el elemento sólido elástico 2D de 4 nodos con dos grados de libertad traslacional por nodo, formulado en el plano YZ. Se está frente a un problema transitorio o de estado no estacionario porque es necesario predecir la respuesta temporal del sistema que interviene en este proceso de transferencia de calor.

El flujo de convección debe considerarse en toda la periferia de la probeta y, dada la limitación de que sólo una cara del elemento puede ser sometida a transferencia de calor por convección, se debe crear un mallado especial en el elemento de esquina superior del modelo, generándose lo que en la bibliografía se denomina elemento "hipercúbico". Este mallado se visualiza en la Figura 1 (4). La vinculación considerada es la impuesta por las condiciones de simetría.

Se analizaron modelos en los cuales los hormigones fueron sometidos a temperaturas máximas de 300, 500 y 700 °C y mantenidos a dichas temperaturas durante diferentes tiempos (0.5; 1 y 2 horas).

De acuerdo a lo indicado precedentemente la complejidad de este análisis radica fundamentalmente en la inexistencia de valores del coeficiente de transferencia de calor en la bibliografía disponible lo que conlleva a realizar un análisis previo que permita la calibración de dicho parámetro utilizando los resultados experimentales disponibles.

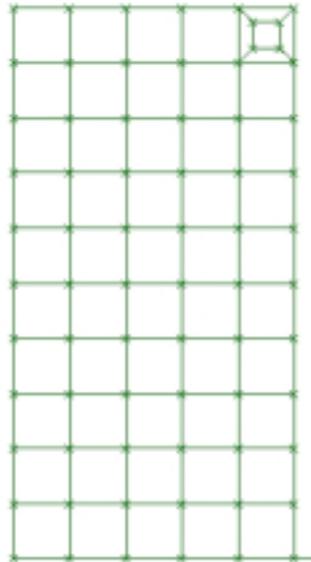


Figura 1: Mallado de los modelos analizados

3 CALIBRACIÓN DE PARAMETROS

A continuación se indica el análisis previo que permitió la calibración del coeficiente de transferencia de calor por convección h . A tal fin, se dispone de los valores experimentales de las temperaturas alcanzadas dentro una probeta durante su proceso de calentamiento (5) en los puntos indicados en la Figura 2.

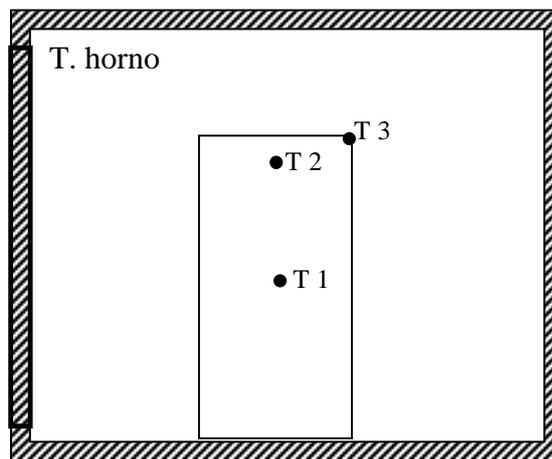


Figura 2: Identificación de puntos.

Los datos experimentales considerados para esta calibración fueron determinados en experiencias realizadas en probetas cilíndricas (15 x 30 cm) las que fueron calentadas en un horno eléctrico con control automático de temperatura, revestido con material refractario y

aislante, calefaccionado con resistencias y el cual posee ventilación en la parte superior para permitir la evaporación de gases. El calentamiento se inició con las probetas a temperatura ambiente y hasta alcanzar la temperatura máxima estipulada en cada caso, manteniéndolas a dicha temperatura durante los tiempos mencionados con anterioridad.

Dado que los agregados utilizados en los hormigones de los ensayos experimentales son de origen granítico, de acuerdo a la Tabla 1 se elige un valor de conductividad térmica $2.7 \text{ J/seg. m}^\circ\text{C}$.

Los otros datos requeridos para la resolución del modelo son:

Densidad de masa: 2351 kg./m^3

Calor específico: $1047 \text{ j/kg}^\circ\text{C}$

En la Figura 3 se muestran las correlaciones entre los datos experimentales y las simulaciones realizadas llegando a la conclusión que el coeficiente adecuado para este caso es $h= 13 \text{ J/m}^2\cdot\text{seg.}^\circ\text{C}$ por ser el que mejor reproduce la respuesta validada con la obtenida experimentalmente.

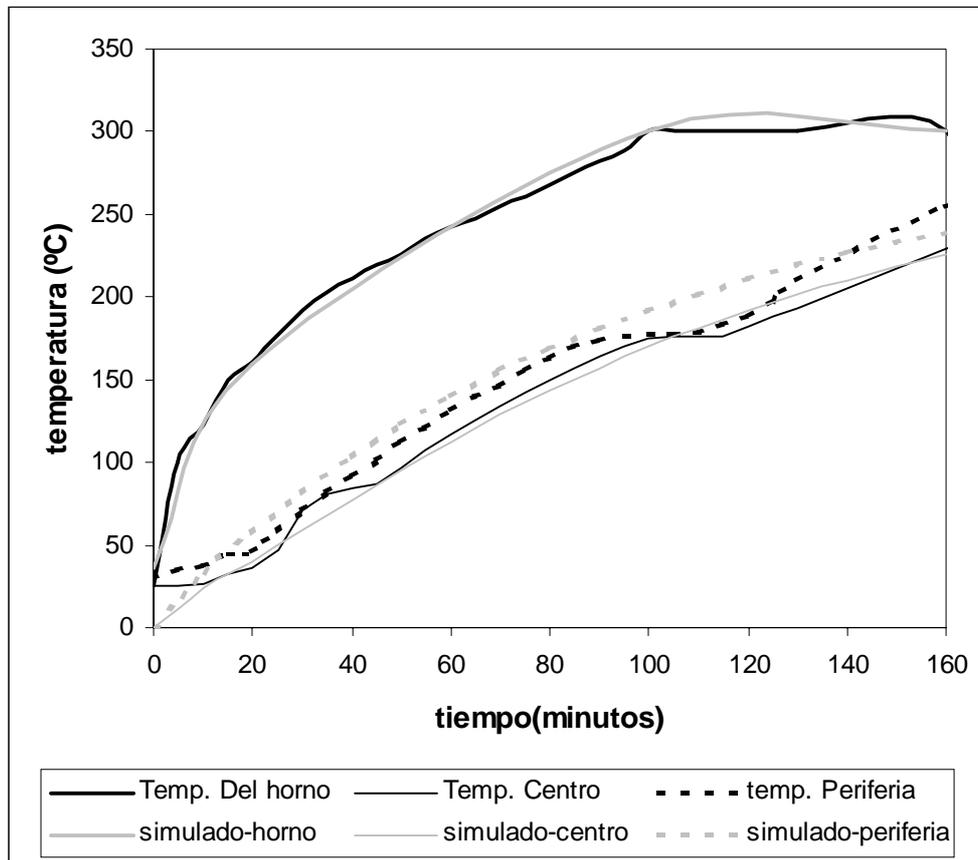


Figura 3: Curvas experimentales y simuladas

En la Figura 4 se observa la distribución de temperaturas en el seno de la probeta

correspondiente a diferentes tiempos de exposición: $t= 40, 80, 120$ y 160 minutos.

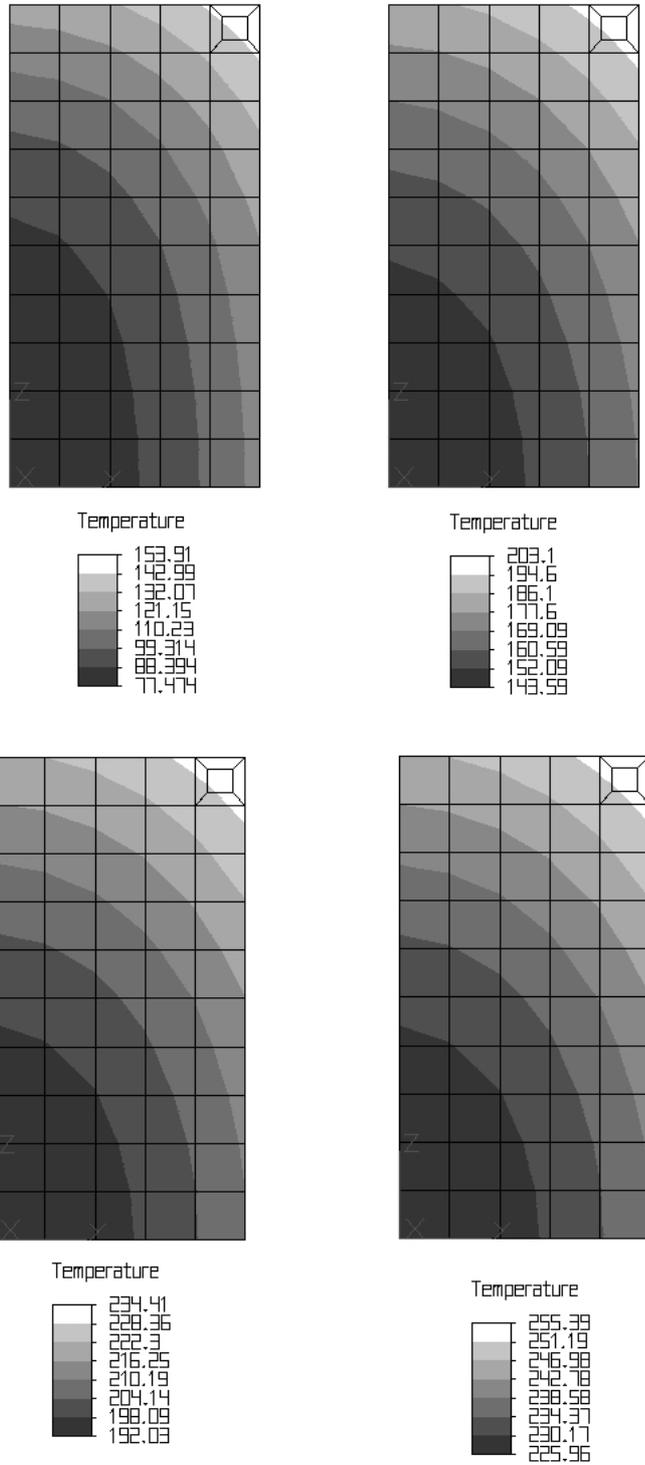


Figura 4: Distribución de temperaturas

Realizada la calibración del parámetro h se procedió al análisis de los modelos indicados en el punto 2.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

En los modelos sometidos a 300, 500 y 700 °C durante 0,5; 1 y 2 horas, se tomaron los datos de las temperaturas máximas alcanzadas en el centro de la probeta (T_1), en la periferia (T_2) y la máxima alcanzada (T_3) en correspondencia con los puntos indicados en la Figura 2. Dichos resultados se indican en la Tabla 2 en la cual también se ha incorporado la diferencia entre la temperatura máxima alcanzada y la temperatura en el centro.

Tabla 2: Resultados obtenidos.

TEMP. DE EXPOSICION °C	TIEMPO DE EXPOSICION hs	TEMPERATURA CENTRO (T_1) °C	TEMPERATURA PERIFERIA (T_2) °C	TEMPERATURA MÁXIMA (T_3) °C	DIFERENCIA MÁX. (T_3-T_1) °C
300	0.5	201.71	219.15	240.44	38.73
	1.0	225.96	239.33	255.39	29.43
	2.0	258.23	265.92	275.06	16.83
500	0.5	333.31	360.98	397.41	64.1
	1.0	372.63	395.51	422.98	50.35
	2.0	427.84	440.98	456.62	28.78
700	0.5	460.57	502.82	554.38	93.81
	1.0	519.3	551.68	590.57	71.27
	2.0 ^(*)	597.44	616.05	638.18	40.74

(*) Para 700 °C y 2 horas de exposición no se cuenta con datos experimentales

Por otro lado, tomando como base la evaluación de la pérdida de resistencia realizada experimentalmente (6) se establece la relación entre dicha pérdida y la temperatura alcanzada en los modelos numéricos en el centro según lo indicado en Tabla 2. Esta relación se puede observar en las Figuras 5 y 6 las cuales corresponden a hormigones de diferentes razones agua-cemento, los que fueron sometidos a dos tipos de enfriamiento, en un caso lento (en el interior del horno) y otro rápido en donde las muestras fueron extraídas del horno inmediatamente después de haberse cumplido el tiempo establecido y enfriadas con chorros de agua durante aproximadamente media hora.

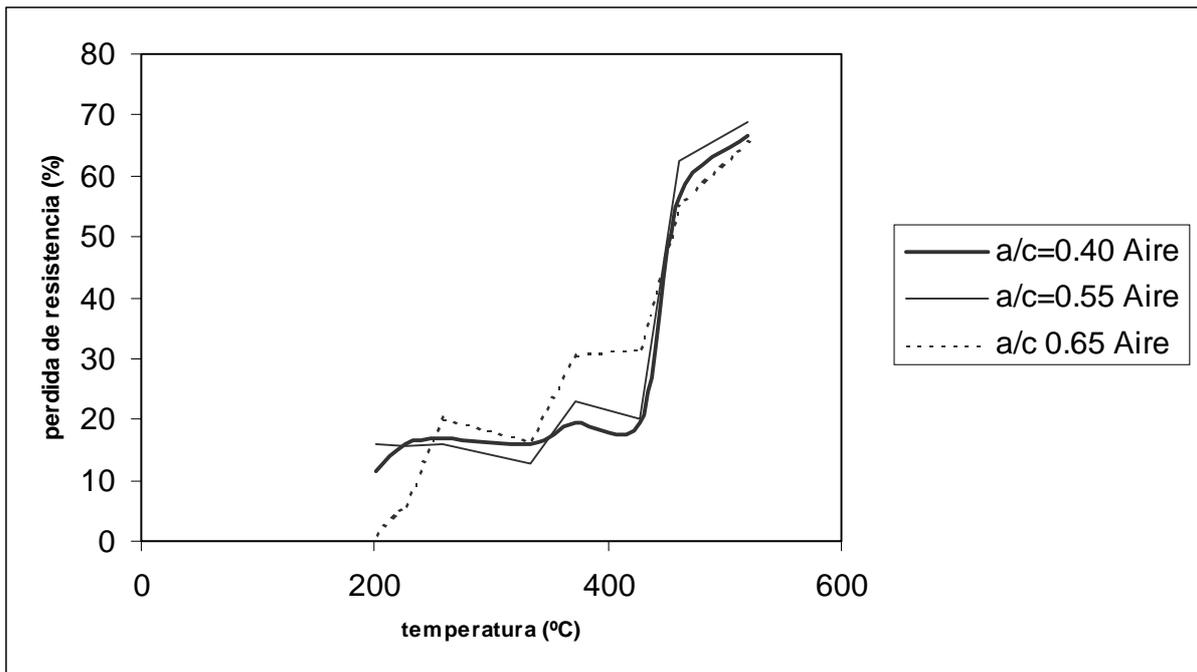


Figura 5: Pérdida de resistencia a compresión en probetas enfriadas lentamente (al aire).

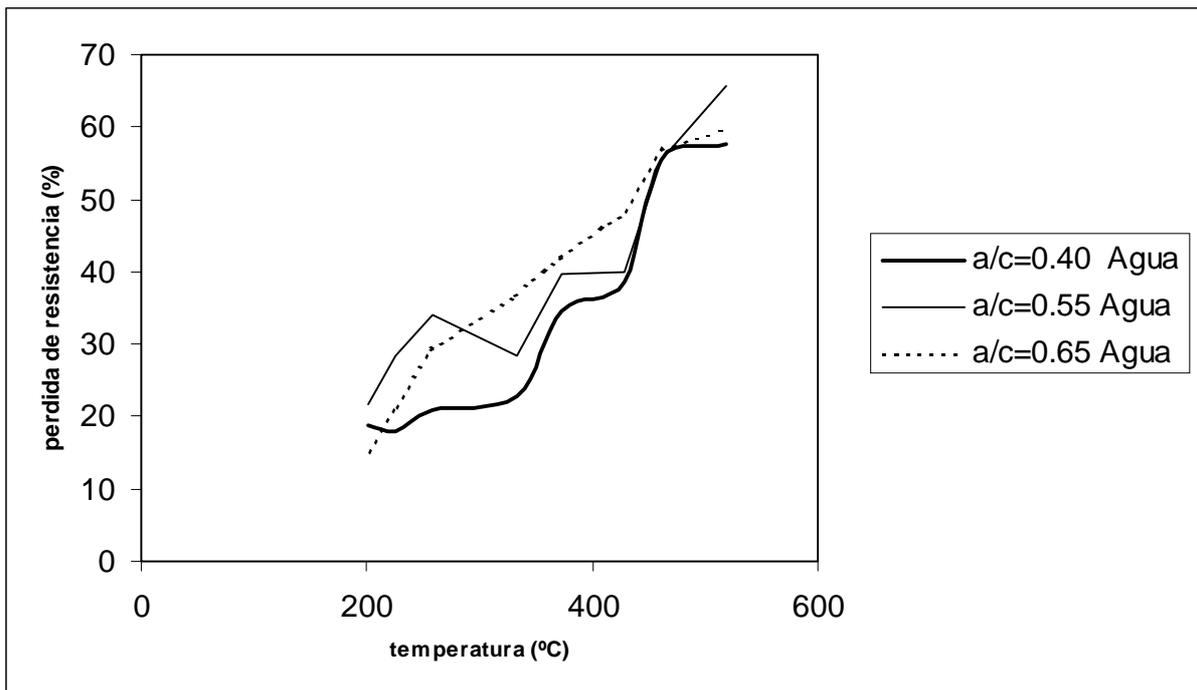


Figura 6: Pérdida de resistencia a compresión en probetas enfriadas con agua.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La obtención del perfil térmico en un elemento depende directamente del coeficiente de transferencia de calor por convección h , el cual puede obtenerse por calibración dada en el punto 3.

Los resultados indicados en la Tabla 2 permiten visualizar el perfil térmico de las probetas para las distintas temperaturas y tiempos de exposición. Se puede indicar que, de acuerdo a la diferencia máxima (T_3-T_1), el salto térmico entre la máxima temperatura alcanzada y la temperatura en el centro de la probeta es mayor cuanto mayor es la temperatura del horno y menor cuando aumenta el tiempo de exposición.

De las Figuras 5 y 6, en donde se representan las pérdidas porcentuales de resistencia a compresión obtenidas experimentalmente, se puede observar la influencia que adquiere el tipo de enfriamiento sobre dicho parámetro, siendo mucho más notorio para el caso en que las muestras son enfriadas en forma rápida (chorros de agua). Además, puede observarse que dicha disminución se acentúa a partir del momento en que se alcanzan 400 °C en el centro de la probeta, siendo a su vez más notorio para el caso del enfriamiento lento (dentro del horno).

6 CONSIDERACIONES FINALES

El desarrollo del presente trabajo permitió valorar el coeficiente de transferencia de calor por convección h , a través de la validación con los resultados experimentales disponibles, para el caso particular analizado de una probeta de hormigón expuesta a altas temperaturas.

Se optimizó el mallado del modelo para permitir la convección en los elementos de esquina arribando al uso del elemento "hipercúbico" que da solución a esta aplicación.

Complementariamente al análisis experimental, el análisis numérico posibilita la visualización del perfil térmico, lo que constituye un aporte interesante de esta metodología de análisis, ya que permite conocer la temperatura máxima alcanzada en el seno de la probeta, parámetro que está directamente relacionado con el daño que se producirá en la misma y que ha ocasionado las pérdidas de resistencia determinadas. Se corrobora también la gran influencia de la acción térmica cuando el perfil térmico alcanza temperaturas mayores de 400°C en el seno de la probeta.

En futuras etapas de trabajo, a través del análisis numérico experimental, se pretende valorar el coeficiente de convección h para otros tipos de acciones térmicas.

7 REFERENCIAS

1. Metha, P.K; Monteiro, P.J.M., CONCRETE Structure, Properties, and Materials, Segunda edición, 1993, Editorial Prentice-Hall.
2. Mills, A.F.; TRANSFERENCIA DE CALOR, 1995, Editorial IRWIN.
3. ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE- PART 3, Control of Cracking in Concrete Structures, ACI 224R-90, Punto 7.3.

4. Algor Docutech
5. Di Maio, A., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico de hormigones expuestos a altas temperaturas". V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones y VII Congreso de control de calidad. Montevideo, Uruguay. 1999. pp. 331-338.
6. Di Maio, A.; Traversa L., "Evaluación de hormigones expuestos a temperatura mediante el ensayo break-off", IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construcoes, pag. 153-159, 1997.