

MODELO TERMO-MECÁNICO PARA HORMIGÓN EXPUESTO A ALTAS TEMPERATURAS

María Inés Figueroa, Bibiana Luccioni*, Rodolfo Danesi*

*CONICET

Instituto de Estructuras

Universidad Nacional de Tucumán

CC. 134, Correo Central, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina

e-mail: bluccioni@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

Las temperaturas elevadas inducen cambios micro-estructurales severos que alteran el comportamiento físico-mecánico del hormigón. La estructura porosa del hormigón y, por lo tanto, sus propiedades físicas, cambian con el tiempo siguiendo la evolución de los procesos de hidratación y envejecimiento y son fuertemente influenciadas tanto por la carga mecánica y el estado higro-térmico del hormigón, como por sus historias en el tiempo.

En este trabajo se desarrolla un modelo termo-mecánico para hormigones expuestos a altas temperaturas basado en la extensión de un modelo mecánico de plasticidad acoplada con daño para considerar el efecto de la deshidratación de la pasta de cemento producida por las elevadas temperaturas.

En primer lugar, se presentan las bases termodinámicas del modelo. A continuación se describe el tratamiento numérico del problema termomecánico acoplado. Finalmente se desarrollan ejemplos de aplicación y comparación con resultados de elementos de hormigón expuestos a altas temperaturas que permiten validar el modelo propuesto.

ABSTRACT

Severe micro-structural changes that alter the physical-mechanical behavior of concrete are induced by high temperatures. The porous structure and therefore physical properties of concrete change with time following the hydrate and aging processes evolution and they are strongly influenced not only by mechanical load and higro-thermal state but also by their time histories.

A thermo-mechanical model for concrete exposed to high temperatures is presented in this paper. The model is based on a plastic-damage model extended to take into account the effect of the cement paste dehydration produce by high temperatures.

Thermodynamic bases of the model are first presented followed by the description of the numerical approach used to solve the coupled thermo-mechanical problem. Finally application examples and comparison with experimental results of concrete elements exposed to high temperatures that allow validating the proposed model are presented.

INTRODUCCIÓN

En muchos problemas modernos de ingeniería el hormigón resulta expuesto a rangos de temperaturas superiores a las exposiciones ambientales normales (mayores a 50°C), como cuando forma parte de instalaciones industriales (hornos, recipientes de presión, chimeneas, reactores nucleares); o en situaciones accidentales como en explosiones o incendios.

Entre los efectos más importantes de la temperatura se pueden citar: incremento en la porosidad, expansión térmica y retracción, pérdida de resistencia (decohesión térmica), fisuración térmica debido

a incompatibilidad térmica, degradación del módulo elástico (daño térmico), fluencia lenta térmica, y estallido térmico explosivo debido a la excesiva presión de poros [1][2][3].

Dentro de los modelos desarrollados para simular el comportamiento termomecánico del hormigón sometido a altas temperaturas se pueden citar los trabajos de Heinfling [4], Gawin [5], Ju [1] y Ulm [3]. En general, los complejos modelos existentes no tienen en cuenta simultáneamente la totalidad de los cambios mecánicos irreversibles que se producen por efecto de las altas temperaturas y posterior enfriado.

MODELO CONSTITUTIVO

Introducción

En este trabajo se presenta un modelo de plasticidad acoplada con daño [6] extendido para tener en cuenta el efecto de la deshidratación de la pasta de cemento [3][7] en el comportamiento mecánico del hormigón. Reproduce el incremento en la porosidad, la expansión térmica, la pérdida de resistencia debida a la decohesión térmica, la degradación del módulo elástico o daño térmico y la variación del coeficiente de Poisson que experimenta el hormigón expuesto a altas temperaturas.

Bases Termodinámicas

El modelo es termodinámicamente consistente y está basado en la hipótesis de elasticidad desacoplada [8]. La energía libre puede suponerse formada por dos partes independientes: una parte elástica y una parte quimio-plástica [3]:

$$\Psi(\varepsilon_{ij}^e, \alpha_i, d, \xi, \theta) = \Psi^e(\varepsilon_{ij}^e, d, \xi, \theta) + \Psi^{qp}(\alpha_i, \xi, \theta) \quad (1)$$

Donde Ψ es la densidad de energía libre por unidad de volumen, Ψ^e es la densidad de energía libre termo-elástica, Ψ^{qp} es la densidad de energía quimio-plástica, $\varepsilon_{ij}^e = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p$ es el tensor de deformaciones elásticas, ε_{ij} es el tensor de deformaciones, ε_{ij}^p es el tensor de deformaciones plásticas, d es la variable de daño mecánico, α_i es un conjunto de variables internas plásticas, θ una medida de la temperatura y ξ es el grado de deshidratación de la pasta de cemento que representa una medida del deterioro producido por las altas temperaturas. Se propone la siguiente expresión para la energía libre termo-elástica [9]:

$$\Psi^e = \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^e C_{ijkl}^s(d, \xi) \varepsilon_{kl}^e - (\theta - \theta_0) \beta_{ij}(d, \xi) \varepsilon_{ij}^e - \frac{1}{2\theta_0} c_\kappa(d, \xi) (\theta - \theta_0)^2 \quad (2)$$

Donde $C_{ijkl}^s(d, \xi) = \frac{\partial^2 \Psi^e(d, \xi)}{\partial \varepsilon_{ij}^e \partial \varepsilon_{kl}^e}$ es el tensor constitutivo secante afectado por la degradación mecánica caracterizada la variable de daño escalar d y el proceso de deshidratación que produce un daño isótropo.

$$C_{ijkl}^s = (1-d) C_{ijkl}^h(\xi) = (1-d) \left[\frac{E(\xi) \nu(\xi)}{(1+\nu(\xi))(1-2\nu(\xi))} \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{E(\xi)}{2(1+\nu(\xi))} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right] \quad (3)$$

Donde $E(\xi)$ y $\nu(\xi)$ son el módulo elástico y el coeficiente de Poisson afectados por el proceso de deshidratación que pueden ser obtenidos experimentalmente [7].

$\beta_{ij}(d, \xi) = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta \partial \varepsilon_{ij}^e} = C_{ijkl}^s(d, \xi) \alpha_{kl}$ es el tensor de acoplamiento termoelástico; $c_k(d, \xi) = -\theta_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta^2}$ es el calor específico y θ_0 la temperatura de referencia.

La parte quimioplástica de la energía libre se escribe como:

$$\Psi^{qp}(\alpha_i, \xi, \theta) = \Psi^p(\alpha_i, \xi) + \Psi^{q\theta}(\xi, \theta) = \frac{1}{2} \alpha_i K_{ij}(\xi) \alpha_j + \Psi^{q\theta}(\xi, \theta) \quad (4)$$

Donde $K_{ij}(\xi)$ es el tensor de endurecimiento plástico que depende del grado de deshidratación.

Las ecuaciones constitutivas secantes pueden obtenerse a partir de las relaciones de Coleman que aseguran el cumplimiento de la desigualdad de Clausius Duhem [8]:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Psi^e}{\partial \varepsilon_{ij}^e} = C_{ijkl}^s(d, \xi) \varepsilon_{kl}^e \cdot (\theta - \theta_0) \beta_{ij} ; \eta = -\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \beta_{ij}(d, \xi) \varepsilon_{ij}^e + c_k(d, \xi) \frac{\theta - \theta_0}{\theta_0} - \frac{\partial \Psi^{q\theta}}{\partial \theta} \quad (5)$$

Donde σ_{ij} es el tensor de tensiones, η la entropía específica por unidad de volumen

La disipación puede escribirse como:

$$\Xi = \Xi_{qm} + \Xi_{\theta} \geq 0 ; \Xi_{qm} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p + \zeta_i \dot{\alpha}_i + Y \dot{d} + A \dot{\xi} \geq 0 ; \Xi_{\theta} = -\frac{1}{\theta} q_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \geq 0 \quad (6)$$

donde: q_i es el flujo de calor por conducción, x_i las coordenadas espaciales,

$\zeta_i = -\frac{\partial \Psi^{qp}}{\partial \alpha_i}$; $Y = -\frac{\partial \Psi^e}{\partial d}$; $A = -\frac{\partial \Psi}{\partial \xi}$ son las fuerzas termodinámicas conjugadas de las variables internas plásticas, del daño mecánico y del grado de deshidratación respectivamente. En particular $A = -\frac{\partial \Psi}{\partial \xi}$ es lo que se denomina *afinidad* [3].

Combinando la primera con la segunda ley de la Termodinámica y la ley de conducción del calor de Fourier [10]; se puede escribir la siguiente ecuación de balance térmico:

$$c_k \dot{\theta} - k \nabla_x^2 \theta - l \dot{\xi} + \left(\theta \beta_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^e - h \dot{d} - \Xi_{qm} \right) = r \quad (7)$$

donde $l = \theta_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi \partial \theta}$ es el calor latente de deshidratación ($l \leq 0$), $h = \theta_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial d \partial \theta}$; k es la conductividad y r son fuentes de calor distribuidas por unidad de volumen. El término entre paréntesis representa el acoplamiento termomecánico [3].

Proceso elastoplástico dañado

Los umbrales plásticos y de daño se describen a través de las siguientes funciones [6][11][7]:

$$\bar{F}^p(\sigma_{ij}, \kappa^p, \xi) = \frac{f^p(\sigma_{ij})}{f_{red}^p(\xi)} - K^p(\kappa^p) = 0 \quad ; \quad \bar{F}^d(\sigma_{ij}, \kappa^d, \xi) = \frac{f^d(\sigma_{ij})}{f_{red}^d(\xi)} - K^d(\kappa^d) = 0 \quad (8)$$

Donde $K^p(\kappa^p)$ y $K^d(\kappa^d)$ son las funciones de endurecimiento plástico y de daño que dependen de las variables de endurecimiento plástico κ^p y de daño κ^d respectivamente [6].

La evolución de la deformación plástica se describe a través de una regla de flujo no asociada y se obtiene conjuntamente con la evolución del daño mecánico a partir de la solución simultánea de las condiciones de consistencia plástica y de daño [6], $\dot{F}^p = 0$ y $\dot{F}^d = 0$ respectivamente.

Evolución de la deshidratación

La ley de evolución de la deshidratación debe escribirse en términos de la fuerza termodinámica asociada o afinidad A , que expresa el desbalance termodinámico entre la moléculas de agua en el gel de cemento y aquellas que se encuentran en los macroporos. ξ puede ser considerado como una velocidad de difusión, que depende de la diferencia de potencial entre el agua en los microporos y el espacio de los poros capilares. A nivel de macromodelo esta diferencia de potencial se expresa a través de la afinidad A y se puede adoptar una forma discreta de la ley de Fick [3]:

$$A = \mu \frac{d\xi}{dt} e^{(E_a/R\theta)} \quad (9)$$

Donde μ es un coeficiente relacionado con la microdifusión, E_a es la energía de activación y R la constante universal de los gases. El término de Arrhenius $e^{(E_a/R\theta)}$ tiene en cuenta el hecho de que la reacción en los microporos ocurre más rápidamente cuanto mayor es la temperatura.

Si se considera ahora un ensayo en el que se aplica instantáneamente un incremento de temperatura $\theta - \theta_0$ y se tiene en cuenta sólo los términos lineales, se obtiene:

$$A = -\frac{l}{\theta_0}(\theta - \theta_0) - \kappa\xi = \eta \frac{d\xi}{dt} e^{(E_a/R\theta)} \quad ; \quad \kappa = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2} = \frac{1}{2} \alpha_i \frac{\partial^2 K_{ij}}{\partial \xi^2} \alpha_j + \frac{\partial^2 \Psi^q}{\partial \xi^2} \quad (10)$$

Donde κ es una constante de equilibrio del proceso termodinámico considerado.

El aumento de temperatura $\theta - \theta_0$ induce un desbalance termodinámico $A > 0$ que produce la deshidratación $\xi > 0$ hasta que se alcanza el equilibrio termodinámico, esto es $A = 0$

$$\xi(\theta) = -\frac{l}{\kappa\theta_0}(\theta - \theta_0) \quad (11)$$

Suponiendo μ constante, la evolución del grado de deshidratación puede escribirse:

$$\xi(t) = \xi(\theta) \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_d}\right)} \right] \quad ; \quad \tau_d = \frac{\eta}{\kappa} e^{E_a/R\theta} \quad (12)$$

τ_d es el tiempo característico de microdifusión entre microporos y el espacio capilar que decrece con

el aumento de la temperatura. Se puede estimar aproximadamente este tiempo característico como:

$$\tau_d \leq 5 \text{ min para } \theta = 20^\circ \text{C}; \quad \tau_d \leq 0.1 \text{ s para } \theta = 300^\circ \text{C}; \quad \tau_d \leq 0.001 \text{ s para } \theta = 700^\circ \text{C}$$

Si se considera el transporte de calor en una estructura real, se llega a la conclusión de que el proceso de deshidratación se puede considerar casi terminado para dicha escala de observación. En otras palabras, esto revela la existencia de una función de deshidratación térmica única: $\xi = \xi(\theta)$ obtenida del equilibrio termodinámico.

Alternativamente la evolución del grado de deshidratación puede ser obtenida indirectamente a través de los efectos de la deshidratación en la rigidez elástica o en la resistencia. Suponiendo que la relación entre el módulo elástico degradado y el inicial es proporcional al grado de hidratación, lo cual es una propiedad intrínseca de los materiales de base cementicia [3], se puede utilizar las curvas experimentales de variación del módulo elástico con la temperatura [7] para encontrar dicha función

$$\text{como: } \xi(\theta) = 1 - \frac{E(\theta)}{E_0}$$

IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

Acoplamiento termo-mecánico [12]

Cuando se evalúa el comportamiento de hormigones expuestos a altas temperaturas aparecen tres problemas que interactúan entre sí: la deshidratación del hormigón, el problema mecánico y el problema térmico. La temperatura influye directamente en el problema de la deshidratación y sus variaciones producen deformaciones térmicas, que al ser impedidas, generan tensiones térmicas. Por otro lado, la deshidratación influye sobre el problema mecánico debido a que las propiedades elásticas, plásticas y de daño evolucionan con el proceso de deshidratación. El proceso de deshidratación produce además una disminución de calor que modifica la historia térmica del hormigón. En el problema planteado existen otras interacciones que son despreciables frente a las ya mencionadas y no son consideradas en este trabajo.

Teniendo en cuenta que el acoplamiento termo-mecánico y deshidratación-mecánico tienen importancia únicamente en ese sentido, se plantea una solución desacoplada del problema. En cada incremento de tiempo se resuelve en primer lugar el problema térmico simultáneamente con el problema de deshidratación y luego, considerando constantes los valores de temperatura y deshidratación obtenidos, se resuelve el problema mecánico.

Discretización espacial y temporal de las ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones matriciales correspondientes a la forma débil de las ecuaciones de balance térmico y de movimiento resultan:

$$\begin{cases} C_\theta \dot{\Theta} + K_\theta \Theta - f_\theta - f_\xi = 0 \\ M_u \ddot{U} + f_u^{int} - f_u^{ext} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

Donde U es el vector de desplazamientos nodales, Θ el vector de temperaturas nodales, M_u la matriz de masa dinámica, f_u^{int} el vector de fuerzas internas, f_u^{ext} el vector de fuerzas mecánicas externas, C_θ la matriz de capacidad calórica, K_θ la matriz de conductividad térmica, f_θ el vector de fuerzas térmicas y $f_\xi = K_\xi \Theta$ el vector relacionado con la pérdida de calor por deshidratación que

puede expresarse como una función explícita de la temperatura .

Para la discretización temporal de la primera ecuación se utiliza un esquema de tipo Euler-Backward que es incondicionalmente estable y para la discretización temporal de la segunda ecuación se usa el Método de Newmark. En este último caso se realiza una subcrementación del tiempo [13].

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Ensayos de resistencia residual

Con el fin de evaluar el funcionamiento del modelo propuesto, se modeló la evolución de la temperatura y del grado de deshidratación, en probetas cilíndricas (150x300 mm), expuestas a diferentes temperaturas, tiempos de exposición y tipos de enfriamiento [14][15]. En la Fig.1 se muestran la evolución de la temperatura en el tiempo obtenida experimental y numéricamente en distintos puntos de una probeta sometida a una temperatura máxima de 500 °C y el grado de deshidratación alcanzado.

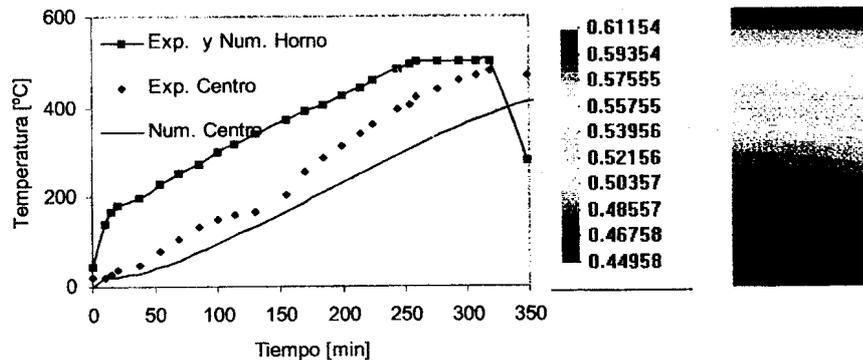


Fig. 1 Evolución de la temperatura y distribución del grado de deshidratación en un cuarto de probeta

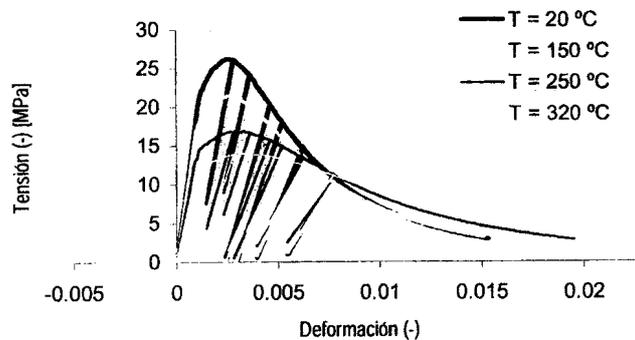


Fig.2 Ensayo a compresión cíclica

Con los resultados de los ensayos de compresión y flexión posteriores al tratamiento térmico de las probetas se calibró la variación de las propiedades mecánicas con la deshidratación [15][7]. A modo de ejemplo, en la Fig.2 se muestran las curvas tensión-deformación correspondientes a un ensayo de

compresión cíclica [6] de probetas de hormigón sometidas previamente a distintas temperaturas máximas y luego enfriadas. Se observa la pérdida de resistencia, rigidez y energía de fractura.

Incendio en el Túnel del Canal de la Mancha [16]

A continuación se presentan los resultados de la simulación numérica del incendio que se produjo en el canal de la Mancha en 1996, en el cual el fuego ardió durante 12 hs., alcanzando temperaturas del orden de 700 °C. El hormigón se desprendió por capas, quedando totalmente destruidas porciones de hasta 20 cm de espesor. En la Fig.3 se muestra la malla de elementos finitos utilizada para modelar un cuarto de túnel y la roca circundante, las condiciones de borde y las propiedades mecánicas del material. Las figuras 4 y 5 muestran la distribución del grado de deshidratación final y el daño mecánico después de 15 min de incendio obtenidos para una variación de temperatura fijada por la Norma ISO 834 [16]. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por otros investigadores [16] y con el daño observado en las paredes del túnel después del incendio.

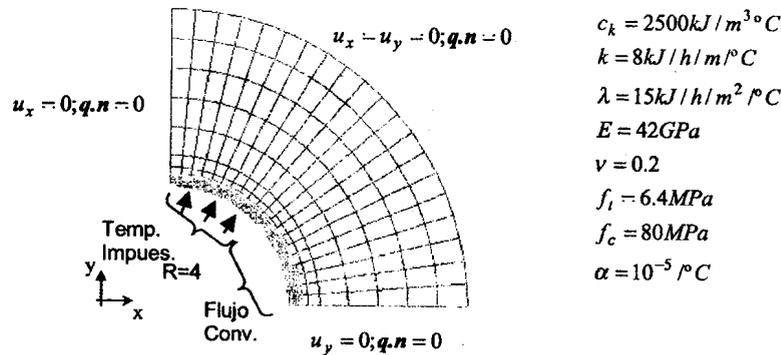


Fig.3 Malla de elementos finitos y propiedades del material del túnel

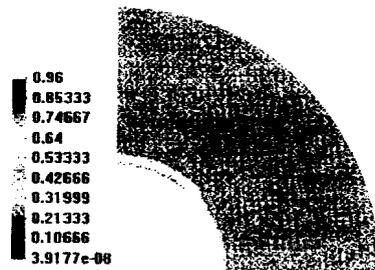


Fig.4 Grado de deshidratación (t=12 hs)

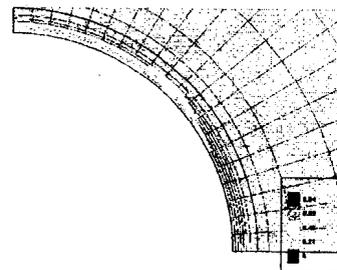


Fig.5 Daño mecánico (t=15 min)

CONCLUSIONES

Se propone un modelo termo-mecánico para el tratamiento de hormigones expuestos a altas temperaturas. Se introduce en el modelo mecánico el grado de deshidratación de la pasta de cemento, que a su vez depende de la temperatura, y que es el responsable de los cambios mecánicos observados. De esta forma es posible simular la degradación de las propiedades elásticas residuales y la alteración del comportamiento elastoplástico-dañado a través de una modificación de las funciones de fluencia y

daño similar a la que se utiliza en problemas de fatiga, humedad y suelos semisaturados.

Debido a la naturaleza del acoplamiento termomecánico que se presenta en este tipo de problemas, se utiliza un algoritmo de solución que consiste en resolver simultáneamente la ecuación de balance térmico con la ecuación de evolución de la deshidratación y, en una segunda etapa, la ecuación de movimiento. Se realiza una subincrementación de los pasos de tiempo para la solución del problema mecánico lo cual resulta indispensable debido a la magnitud de las tensiones que se generan, por restricción de las deformaciones térmicas a temperaturas elevadas.

La comparación con los resultados de elementos de hormigón sometidos a altas temperatura muestra que el modelo es capaz de reproducir el comportamiento mecánico residual del hormigón caracterizado por la pérdida de rigidez, disminución de módulo de Poisson y modificación de su comportamiento elastoplástico dañado y la evolución del proceso de deshidratación y del daño mecánico que se produce a lo largo del tiempo por efecto de las altas temperaturas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET y a la UNT por el apoyo económico brindado.

REFERENCIAS

- [1] Ju J.W. and Zhang Y., "Advanced Thermomechanical Constitutive Models for Airfield Concrete Pavement under High Temperatures", *Damage Mechanics in Engineering Materials*, G.Z. Voyiadjis, J. W. W. Ju and J. L. Chaboche (Eds), Elsevier, 1998, págs. 275-283.
- [2] Bazant Z.P., Kaplan M. F., "Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models", Longman Group Limited, London, 1996.
- [3] Ulm F. J., Coussy O. and Bazant Z., "The Chunnel Fire. I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete" *ASCE J. Eng. Mechs.*, Vol. 125, No.3, 1999, págs. 272-282.
- [4] Heinfing G., Reynouard J.M., Merabet O., Duval C., "A Thermo-Elastic Model for Concrete at Elevated Temperatures Including Cracking and Thermo-Mechanical Interaction Strains", *Comp. Plasticity, Fundamentals and Applications*, CIMNE, Barcelona, España, 1997, págs. 1493-1498.
- [5] Gawin D., Mjorana C.E., Pesavento F. and Schrefler B. A., "A Fully Coupled Multiphase Model of Hygro-thermo-mechanical Behavior of Concrete at High Temperature", *Computational Mechanics, New Trends and Applications*, CIMNE, Barcelona, Spain, 1998, págs. 1-19.
- [6] Luccioni B., Oller S. and Danesi R., "Coupled Plastic-Damaged Model", *Comp. Meths App. Mechs and Eng.*, 129, 1996, págs. 81-89.
- [7] Luege M., Luccioni B., Giaccio, G. y Zerbino, R., "Simulación Numérica del Comportamiento de Hormigones Previamente Expuestos a Altas Temperaturas", *Mec.Comp.*, XIX, 2000, págs.157-162.
- [8] Lubliner, J., *Plasticity Theory*, Mc. Millan Publishing U.S.A., 1990.
- [9] Stabler J., Baker G., "On the Form of free Energy and Specific Heat in Coupled Thermo-Elasticity with Isotropic Damage", *Int. J. Solids and Structures* 37, 2000, 4691-4713.
- [10] Maugin G. A., "The Thermomechanics of Plasticity and Fracture", Camb. Univ.Press, 1992.
- [11] Salomón, O., Oñate, E., Oller, S. and Car, E., "Thermomechanical Fatigue Analysis Based on Continuum Mechanics", *Memorias de Mecom 99*, Mendoza, Argentina 1999, págs. 133-142.
- [12] Prato Grasso, T., "Comportamiento del Hormigón en Edades Tempranas. Modelización y Aplicaciones", Tesis de Doctorado, UPC, Barcelona, España, 1999.
- [13] Stabler J., Baker G., "Fractional Steps Methods for Thermo-Mechanical Damage Analyses at Transient Elevated Temperatures", *Int. J. Num. Meths in Engineering*, 48, 2000, págs.761-785.
- [14] Di Maio, A., Giaccio, G. y Zerbino, R., "Relación entre el Módulo de Elasticidad Estático y Dinámico de Hormigones Expuestos a Altas Temperaturas", *Memorias de CONPAT 99*, Montevideo, Uruguay, Tomo II, 1999, págs. 331-338.
- [15] Barragán, B., Di Maio, A., Giaccio, A., Traversa, L., Zerbino, R., "Efecto de las Altas Temperaturas sobre las Propiedades Fisicomecánicas del Hormigón", *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, LEMIT, N° 5, 1997, págs. 51-64.
- [16] Ulm, F. J., Acker, P. and Lévy M., *The Chunnel fire. II: Analysis of Concrete Damage*, *ASCE J. Eng. Mechs.*, Vol. 125, No.3, 1999, págs. 283-289.