

EVALUACIÓN DE FALLA EN ESTRUCTURAS MASIVAS DE HORMIGÓN EN EDADES TEMPRANAS

Marcia Rizo Patrón^a, Ricardo H. Lorefice^a and Guillermo Etse^b

^a*Centro de Mecánica Aplicada y Estructuras (CMAE), Universidad Nacional de Santiago del Estero, Av. Belgrano (S) 1912, 4200, Santiago del Estero, Argentina, rizopatron@gmail.com,*

^b*Centro de Métodos Numéricos y Computacionales en Ingeniería (CEMNCI), Universidad Nacional de Tucumán Av. Roca 1800, 4000, San Miguel de Tucumán, Argentina, getse@herrera.unt.edu.ar.*

Palabras Clave: Hormigón masivo, edad temprana, fisuración, Simulación Numérica.

Resumen. Las estructuras de hormigón masivo son susceptibles de daño interno como consecuencia de los gradientes térmicos originados por el proceso de hidratación química del cemento en edades tempranas. El gradiente térmico interno combinado con las condiciones atmosféricas y las condiciones de borde aplicadas, pueden inducir microfisuras en la masa del hormigón que afecten su durabilidad, resistencia y el periodo de vida útil de la estructura. En este trabajo se presenta un análisis numérico de dicho proceso sobre la base de un modelo termo-químico-mecánico acoplado y su implementación computacional para predecir en forma precisa la distribución de tensiones y evaluar la integridad estructural bajo diferentes condiciones de carga.

1 INTRODUCCIÓN

En edades tempranas del hormigón, cuando el proceso de hidratación del mismo evoluciona rápidamente, se produce en la masa del material el desarrollo de un campo de temperaturas no uniforme. Este fenómeno trae aparejados cambios dimensionales no uniformes, incluyendo la dilatación térmica y la retracción por fragüe. Lo primero es consecuencia de la variación de la temperatura dentro del hormigón debido al calor generado durante la hidratación y la interacción con la temperatura ambiente, la cual es en general variable. Lo segundo se produce como consecuencia de la pérdida de humedad del hormigón hacia la atmósfera. El resultado de ambos procesos redunda en una retracción tridimensional no uniforme. Si las variaciones de temperatura y de humedad son lo suficientemente grandes, se desarrollan tensiones internas. Cuando estas tensiones internas exceden la resistencia del hormigón, la cual es relativamente baja a edades tempranas, pueden generarse fisuras internas en la masa del material, afectando la performance del mismo a largo plazo. Los efectos de esta distribución no uniforme de temperatura y humedad son críticos en las estructuras de hormigón masivo tales como presas y losas de fundación, las cuales están sujetas a un alto riesgo de sufrir daño interno por micro-fisuración debido a las tensiones que se producen en edades tempranas del hormigón.

2 MODELACIÓN DEL PROCESO DE HIDRATACIÓN

Dentro del marco de la teoría de medios porosos parcialmente saturados, se describe al hormigón como compuesto por un esqueleto sólido y dos fases fluidas, la fase reactiva y la fase producto (Coussy, 1996). La reacción química corresponde al proceso de hidratación del cemento, cuya fase A es el agua libre y la B es el agua combinada con el cemento, formando los hidratos. Estas fases fluidas pueden reaccionar químicamente entre sí.

2.1 Amplitud de hidratación

La misma se define por la variable ξ , denominada *amplitud de hidratación*. Es una variable interna ya que su evolución es espontánea y no depende del flujo externo. Representa una medida del progreso de la reacción considerada. Para definir su ley de evolución se adopta una expresión del tipo Arrhenius (Prato et al, 1997) de la forma:

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\eta} \langle A_m \rangle e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

donde η es un parámetro del material, T la temperatura absoluta, E_a es la energía de activación del proceso de hidratación, R la constante universal de los gases y A_m es la afinidad química.

2.2 Entropía y disipación

En el caso de un sistema cerrado, el aporte de entropía se debe sólo al intercambio de calor con el exterior $Q^0 dt$, por lo tanto el balance de entropía es,

$$T_0 \frac{dS}{dt} = Q^0 + \varphi \quad (2)$$

con φ es la disipación y T_0 es la temperatura de referencia. Considerando el hormigón en edades tempranas, esta disipación puede ser primariamente atribuida a las evoluciones irreversibles del esqueleto y a la acción de la reacción de hidratación. Esta última se expresa

en la forma

$$\varphi_{\rightarrow esq} = A_m \frac{dm}{dt} = (g^l - G) \frac{dm}{dt} \geq 0 \quad (3)$$

g^l : entalpía de masa libre (o potencial químico) del agua libre;

G : potencial químico del agua combinada en la fase sólida.

La diferencia de potenciales ($g^l - G$) expresa el desbalance termodinámico entre el agua libre y el agua combinada en la fase sólida y es la fuerza de conducción del proceso de microdifusión que gobierna la reacción de hidratación.

Se identifica a la afinidad A_m como la fuerza termodinámica asociada con la tasa de solidificación del esqueleto \dot{m} . Considerando la expresión de disipación del sistema cerrado dado por la Ec. (3), resulta

$$\varphi = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - S\dot{T} - \dot{\Psi} \geq 0 \quad (4)$$

con Ψ : energía libre de Helmholtz que define el estado termodinámico en función de las variables de estado. Se puede expresar de la forma

$$\Psi = \Psi(T, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\varepsilon}_p, \boldsymbol{\chi}, m) \quad (5)$$

En la (Ec.5), $\boldsymbol{\chi}$ es un vector de variables internas relacionadas con el comportamiento irreversible del material.

Reemplazando la Ec. (5) en la Ec. (4) se obtiene (Ulm y Coussy, 1996)

$$\varphi = \left(\boldsymbol{\sigma} - \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \right) : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \left(S + \frac{\partial \Psi}{\partial T} \right) \dot{T} + \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p + \boldsymbol{\zeta} : \dot{\boldsymbol{\chi}} + A_m \dot{m} \geq 0 \quad (6)$$

El último término de la Ec. (6) surge de la Ec. (3) e implica que

$$A_m = - \frac{\partial \Psi}{\partial m} = - \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \quad (7)$$

Es decir, establece que el desbalance entre el agua libre y el agua combinada en la fase sólida proviene, en el caso de un sistema químico cerrado, de la energía libre Ψ .

3 MODELO TERMOQUÍMICO

3.1 Grado de hidratación y su evolución

Se define el grado de hidratación como

$$r(t) = \frac{\xi(t)}{\xi_\infty} \quad (8)$$

donde $\xi(t)$: amplitud de hidratación en un tiempo t arbitrario

ξ_∞ : amplitud de hidratación para $t = \infty$, en condiciones ideales.

Derivando la expresión de la energía libre de Helmholtz con respecto a la amplitud de hidratación (ver Ec. (7)) y escribiendo la ecuación resultante en función del grado de hidratación se obtiene la expresión matemática para la evolución de r :

$$\dot{r} = \bar{\kappa} \left\langle \left[(\bar{A} + r)(r_\infty - r) - \bar{\alpha} \frac{T - T_0}{T_0} \right] \right\rangle e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (9)$$

3.2 Ecuación de equilibrio térmico

La ecuación de balance de entropía puede expresarse de la siguiente manera,

$$C\dot{T} - \dot{q} = \hat{r} - \nabla \cdot \hat{q} \quad (10)$$

\dot{q} : calor latente de hidratación

\hat{r} : aporte de calor debido a fuentes térmicas

$\nabla \cdot \hat{q}$: aporte de calor debido a conducción

La relación entre el flujo de calor y la temperatura está dada por la ley de Fourier

$$\hat{q} = -\hat{\mathbf{K}} \nabla T \quad (11)$$

donde $\hat{\mathbf{K}}$ es el tensor de conductividad térmica, que para el caso isótropo es: $\hat{\mathbf{K}} = \hat{k} \mathbf{1}$.

Sustituyendo la Ec. (11) en la Ec. (10), y teniendo en cuenta la definición del grado de hidratación,

$$\dot{q} = q_{,r} \dot{r} \quad (12)$$

La ecuación del campo térmico adopta la forma:

$$\rho c \dot{T} = \hat{r} - \nabla \cdot (\hat{\mathbf{K}} \nabla T) + q_{,r} \dot{r} \quad (13)$$

Esta última ecuación es la que gobierna el fenómeno de conducción del calor en régimen transitorio en un medio continuo homogéneo e isótropo.

3.3 Acoplamiento termoquímico

La solución del acoplamiento termo-químico consiste en la solución de la ecuación de equilibrio térmico dado en la Ec. (13) simultáneamente con la ecuación diferencial que gobierna la evolución de la reacción de hidratación, (Ec. (9), Cervera et al, 1998).

Para resolver este sistema de ecuaciones diferenciales se utiliza en la presente implementación, el método de Euler implícito (BEM- *Backward Euler Method*). La evolución de los parámetros elásticos del material, en función del grado de hidratación, se obtienen considerando el modelo de envejecimiento propuesto por Prato et al, (1997).

4 MODELO TERMOQUÍMICO-ELASTOPLÁSTICO

La modelación del proceso químico plástico se basa en la teoría propuesta originalmente por Ulm y Coussy (1996). A diferencia de aquella formulación en la que se considera el endurecimiento plástico debido solamente a la evolución del proceso de hidratación, en la presente propuesta se incluye también el endurecimiento plástico debido a la evolución de la superficie de máxima resistencia mediante un criterio de Drucker-Prager modificado.

4.1 Criterio de Drucker-Prager modificado

El modelo constitutivo considerado es un criterio plástico de superficie única definido por la función clásica de Drucker-Prager que describe la máxima resistencia material en términos

del primer invariante del tensor de tensiones (I_1) y del segundo invariante del desviador de tensiones (J_2). La función de carga para este criterio, considerando endurecimiento isótropo, es

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - 3\alpha \Upsilon \quad (14)$$

donde

$$\Upsilon = k_0 - \zeta = k_0 + r \left[(k_\infty - k_0) + \frac{\partial U_\infty(\chi)}{\partial \chi} \right] \quad (15)$$

$\zeta(r, \chi)$ es la fuerza de endurecimiento termoquímico y χ es la variable que representa la variación volumétrica plástica debido a la evolución del proceso de hidratación y es igual a la traza del tensor de deformaciones plásticas:

$$\chi = \varepsilon_p = tr(\boldsymbol{\varepsilon}_p) \quad (16)$$

La variable U representa la parte de la energía libre que está relacionada con el fenómeno de endurecimiento-ablandamiento termoquímico. Se la denomina “*frozen energy*”. El término “*frozen*” se refiere a la disipación asociada a las evoluciones plásticas. La energía relacionada con las evoluciones irreversibles del esqueleto, la cual es disipada en forma de calor durante un cierto intervalo dt :

$$\varphi_1 dt = \varphi^p dt - dU \quad (17)$$

El diferencial de energía dU no se convierte en calor durante el intervalo dt del proceso de carga plástica ni se recupera como trabajo útil (elástico) durante la descarga sino que se “congela” debido al endurecimiento químico-plástico. De acuerdo con Ulm, desde el punto de vista físico, el origen de esta energía congelada puede asociarse a una microelasticidad de los materiales que constituyen el hormigón. En el nivel de la composición estructural (pasta de cemento, agregados), la retracción inducida por acción capilar y la debida a los gradientes térmicos durante el fraguado del hormigón, no puede ser considerada como homogénea resultando entonces un estado complejo de micro-tensiones, acompañado por la deformación irreversible del esqueleto. Debido a la configuración microscópica de la matriz, estas deformaciones permanentes del micro-esqueleto no son homogéneas ni cinemáticamente compatibles por sí solas, sin una deformación elástica que contribuya a la total, aún después de la descarga completa. Esto implica que una cierta cantidad de energía, asociada con la microelasticidad, la cual no ha sido convertida en calor durante la carga no se recupere ni se transforme en trabajo durante la descarga. Este es el origen de la energía congelada.

En la Ec. (15), U_∞ es la energía congelada en el material al estado de hidratación completa. En esta caso, se considera (Rizo Patrón, 2001):

$$\frac{\partial U_\infty(\chi)}{\partial \chi} = \frac{\partial U_\infty(\varepsilon_p)}{\partial \varepsilon_p} = \Omega \varepsilon_p \quad (18)$$

por lo que la expresión para Υ finalmente resulta:

$$\Upsilon = k_0 + r \left[(k_\infty - k_0) + \Omega \varepsilon_p \right] \quad (19)$$

donde k_∞ es la presión de cohesión en hidratación completa, k_0 es la presión de cohesión de referencia correspondiente al grado de hidratación r_0 y Ω es una constante.

4.2 Fuerza de endurecimiento/ablandamiento

Se considera a la fuerza de endurecimiento desacoplada aditivamente en dos términos: uno asociado al endurecimiento producido por la evolución del proceso de hidratación, el que se ha denominado aquí fuerza de endurecimiento termoquímico $\zeta_{iq}(\chi, r)$ y el otro término asociado al endurecimiento plástico por evolución de la superficie plástica denominado fuerza de endurecimiento mecánico $\zeta_m(q)$ (Rizo Patrón et al, (2000), (2003)). La expresión para la primera de estas fuerzas está dada por:

$$\zeta_{iq}(\chi, r) = -\frac{\partial U(\chi, r)}{\partial \chi} = -r(k_\infty - k_0) - r \frac{\partial U_\infty(\chi)}{\partial \chi} \quad (20)$$

y la correspondiente a la segunda fuerza es:

$$\zeta_m(q) = q = \sqrt{\frac{2}{3}} \boldsymbol{\varepsilon}^p : \boldsymbol{\varepsilon}^p \quad (21)$$

El modelo termo-químico-plástico descrito se ha implementado como rutina de usuario en el programa general para cálculo por elementos finitos FEAP (Finite Element Analysis Program versión 7.1, desarrollado por R.L Taylor y colaboradores en la Universidad de Berkeley). La implementación en el entorno *FEAP* permite la utilización de las capacidades no lineales del programa, incluyendo la consideración de campos de temperatura y humedad, con la ventaja de contar con un código fuente abierto que permite al usuario la programación de elementos y modelos constitutivos propios, así como también la posibilidad de generación de rutinas de exportación de datos para post-proceso con diferentes herramientas computacionales tales como la plataforma *GiD* desarrollada por el CIMNE-UPC para pre y post-proceso de análisis numérico en ingeniería.

5 MODELACIÓN COMPUTACIONAL DE HORMIGONES MASIVOS

Como aplicación del modelo, se presenta el análisis de una estructura masiva de hormigón a edades tempranas. La estructura consiste en un cilindro de hormigón de 30 metros de diámetro y 4 metros de altura, ver Figura 1. Durante el proceso constructivo, se debe considerar el comportamiento no lineal del hormigón a edades tempranas para poder reflejar la secuencia de la construcción, los gradientes térmicos, el efecto de la interacción con el proceso de creep, la retracción por fragüe y el desarrollo inicial de la resistencia del hormigón. La aplicación del modelo descrito en el marco brindado por el Método de los Elementos Finitos No Lineal permite estudiar en forma conjunta la interacción entre estos fenómenos y su incidencia sobre el estado tensional resultante en la masa del hormigón, teniendo presentes las condiciones ambientales (temperatura y humedad en el contorno y en el material), geometría tridimensional de la estructura, variación de gradientes térmicos en la masa del hormigón, etc. De este modo, es posible evaluar el riesgo de generación de fisuras indeseadas como resultado de un excesivo desarrollo del calor de hidratación, ya que tal como se ha remarcado previamente, la evolución del calor de hidratación durante el proceso de fragüe en estructuras masivas de hormigón depende de sus dimensiones espaciales, formas, tipos de cemento empleados y de las condiciones ambientales y constructivas, ver recomendaciones del ACI COMMITTEE 207 y CEB-MODEL FIP 90. Una fisuración superficial se puede desarrollar inicialmente debido a la diferencia de temperatura entre la superficie externa más fría y la más caliente en el corazón del hormigón. También se pueden producir fisuras internas como resultado de la retracción restringida por condiciones de borde externas durante el proceso de enfriamiento del hormigón. El proceso de hidratación

involucra la propagación del calor por conducción, convección, radiación, etc. combinando el mismo con la evolución de las propiedades mecánicas del material, las cuales se modifican en el tiempo como consecuencia del proceso mismo de maduración.

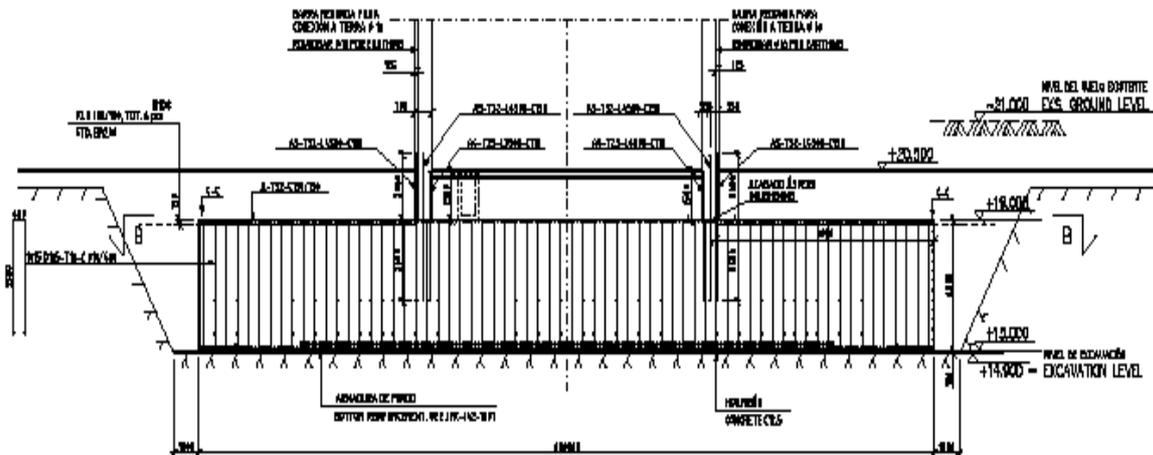


Figura 1. Fundación masiva de hormigón

A fin de tener en cuenta los factores mencionados y su incidencia sobre el comportamiento estructural, los principales aspectos a incluir en el modelo matemático de elementos finitos son los siguientes:

- Espesor de la tongadas durante el proceso de colado
- Tipo de hormigón (propiedades de la mezcla)
- Frecuencia o ritmo de colado
- Condiciones ambientales vigentes durante el proceso

5.1 Análisis del fenómeno de propagación del calor

En el modelo de elementos finitos, la evolución de las temperaturas nodales en el tiempo debido al fenómeno de conducción se realiza considerando la Ley de Fourier, la cual estipula que la tasa de transferencia de calor Q es proporcional al área perpendicular al flujo multiplicada por el gradiente térmico en la dirección de propagación “ x ” (ver Ecs. (10) - (13)), puede expresarse como

$$Q_x = -\kappa A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (22)$$

Q_x : tasa de transferencia de calor

A : superficie orientada normal al flujo

κ : coeficiente de conductividad térmica

$\frac{\partial T}{\partial x}$: gradiente de temperatura

En general, la conductividad térmica de hormigones saturados varía entre 1.21~3.11 kcal/h.m.°C. La conductividad térmica del hormigón tiende a disminuir a medida que la

temperatura se incrementa, pero este efecto no es significativo en relación a los cambios de temperatura ambientes. La incidencia del fenómeno de convección es relevante en la superficie libre del hormigón en contacto con la atmosfera, y se considera aquí a través de una expresión empírica que es función de la velocidad atmosférica del viento:

$$h_c = h_n + h_f = 5.2 + 3.2 v \text{ (m/seg) , con } v = \text{velocidad del viento (m/seg.) con unidades en kcal / m}^2 \text{ h}^\circ\text{C.}$$

$$q = h_c(T - T_\infty) \tag{23}$$

Desde el punto de vista ingenieril, el coeficiente de transferencia de calor por convección, h_c representa la transferencia de calor entre un sólido y un fluido, con T la temperatura superficial del sólido y T_∞ la temperatura media del fluido circundante, considerando que los nodos a los cuales no se les prescribe una temperatura de convección o temperatura constante se encuentran bajo condiciones adiabáticas, ver Figura 2. A los fines del análisis, se considera que la temperatura inicial T_0 del hormigón representa un promedio entre la temperatura del agua, cemento y agregados al comienzo del colado, siendo T_0 una condición inicial para el análisis estructural por elementos finitos (se asume $T_0 = 20^\circ\text{C}$). La temperatura ambiente (T_a) representa la temperatura de curado. En el modelo numérico se adopta una función senoidal a fin de tener en cuenta la amplitud térmica a lo largo del proceso, ver Figura 3. La evolución del calor interno de hidratación en función del proceso de maduración del hormigón se ilustra en la Figura 4, mientras que la incidencia de la temperatura inicial T_0 en el proceso de maduración se presenta en la Figura 5.

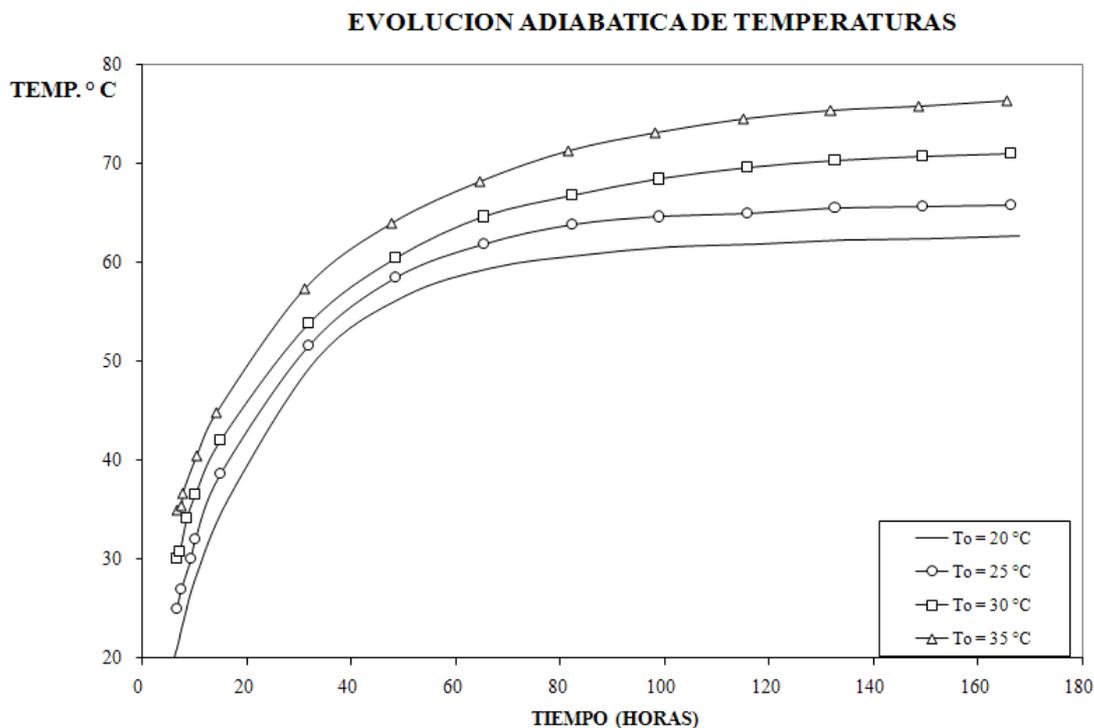


Figura 2. Evolución adiabática de Temperaturas para diferentes valores de T_0

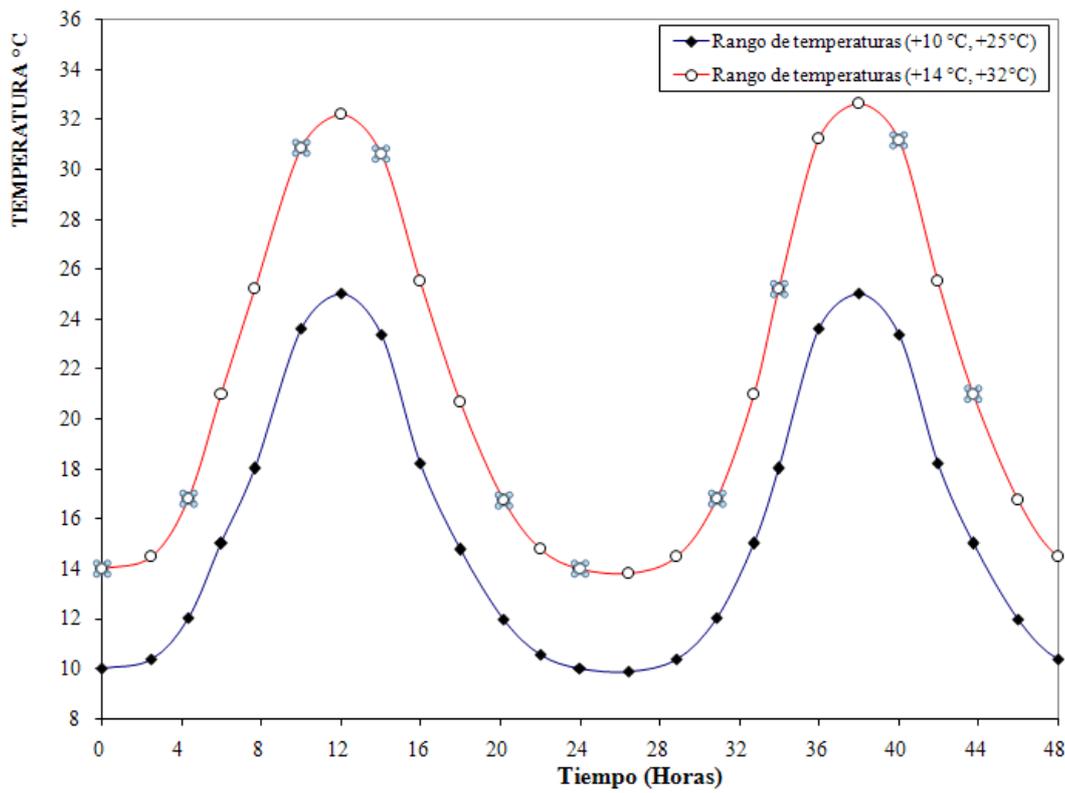


Figura 3. Funciones de evolución de temperaturas ambientales T_a

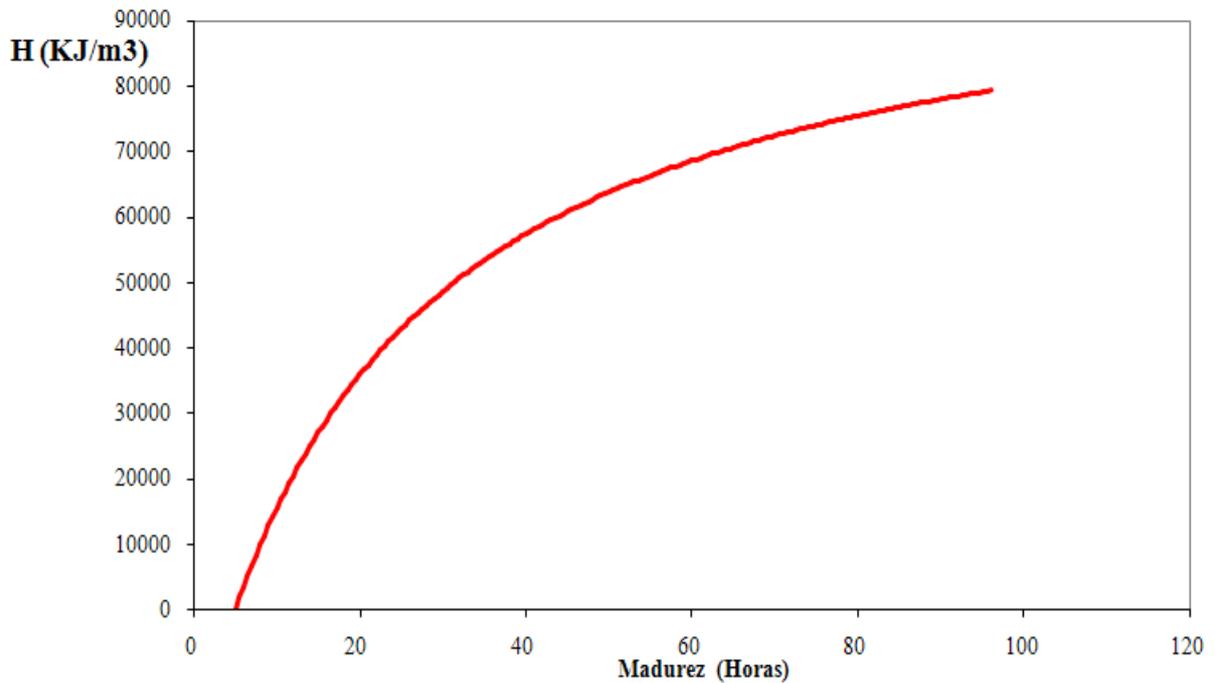


Figura 4. Evolución del Calor de Hidratación vs. maduración del hormigón

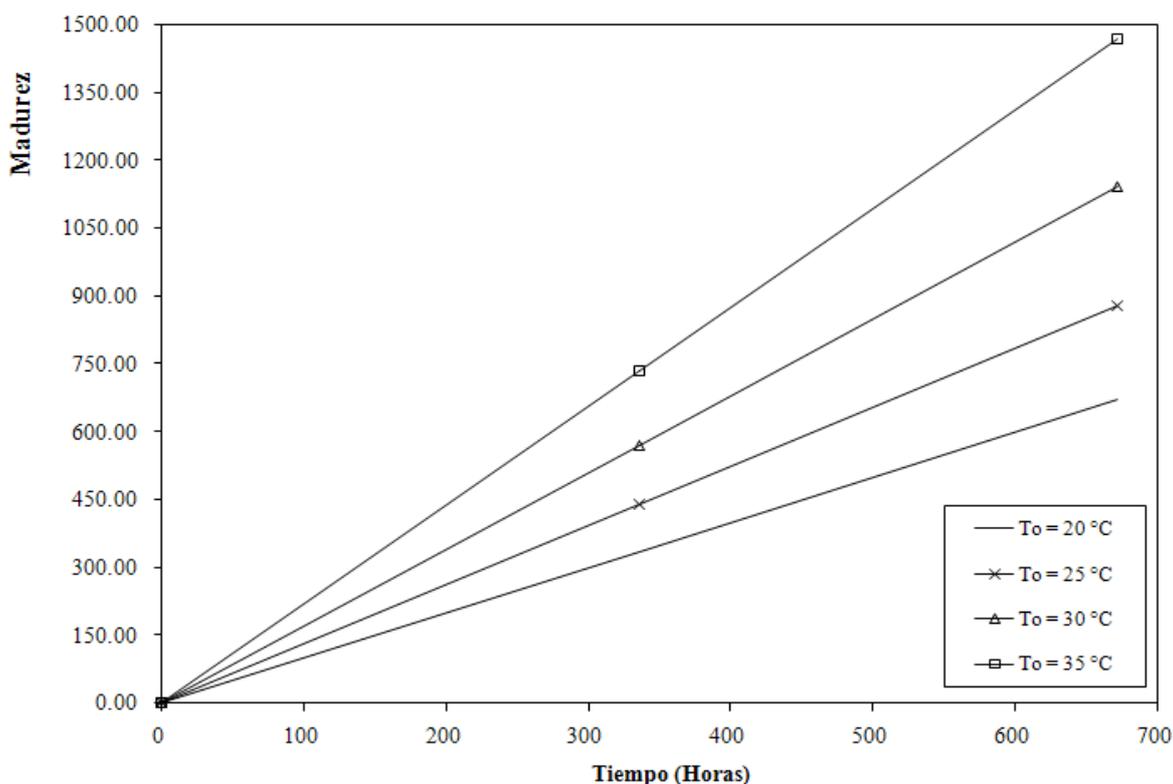


Figura 5. Proceso de maduración del hormigón para diferentes T_0

5.2 Simulación numérica – Construcción en Etapas

Como se puntualizo previamente, dadas las condiciones geométricas de la estructura, es necesario que la simulación numérica sea capaz de reflejar la secuencia constructiva con el fin de que el modelo permita captar la forma en que una etapa particular afecta a las etapas subsiguientes. La estructura evoluciona conjuntamente con las propiedades mecánicas del material tales como el módulo de elasticidad, módulo de Poisson y resistencias a la compresión / tracción del hormigón los cuales son función de la madurez de los elementos y de la etapa constructiva a la que pertenecen. El comportamiento estructural se monitorea mediante el cálculo de deformaciones unitarias, distribución de temperaturas y redistribución de tensiones las cuales se producen desde el inicio del proceso constructivo. El concepto de construcción en etapas se ilustra en la Figura 6. Cada etapa constructiva se define por un determinado tiempo de duración. Debido a las condiciones de axial-simetría de la malla, se asume que los nodos del plano de simetría mismo se encuentran en condiciones adiabáticas. El equilibrio térmico se expresa en términos de temperaturas nodales en función del tiempo. Asimismo, a los fines del análisis numérico, cada una de las etapas se subdivide en pasos. El proceso de colado de la estructura se plantea en términos de la capacidad de colocación disponible, la cual es de 100 m^3 por día en aproximadamente 9 horas.

6 ANÁLISIS COMPUTACIONAL

El análisis computacional involucra una malla de 1235 elementos de 4 nodos los cuales representan una franja central de espesor unitario. La variación de temperatura ambiental a lo largo del proceso se considera por medio de una función senoidal aplicada a los bordes como

condición de convección. En la Figura 7 se ilustran los mapeos de temperatura en la masa del hormigón para las diferentes etapas del proceso. La primera etapa constructiva incluye una capa de elementos representativa del suelo de fundación (CS1- Construction Stage 1).

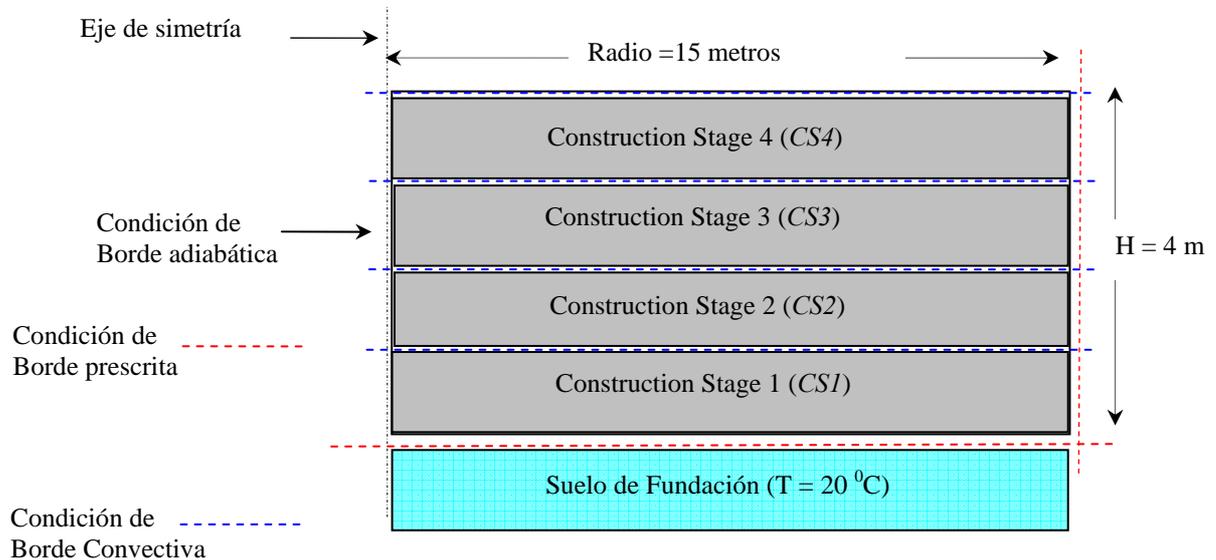


Figura 6. Esquema de análisis por etapas– Modelo

La segunda etapa se activa al tiempo $t = 96$ horas, la tercera a $t = 192$ y la cuarta y última etapa a $t = 288$ horas. La temperatura pico que predice el modelo es de 65°C durante la etapa 3 (Figura 7). En la misma, el gradiente térmico entre el núcleo del hormigón y la superficie es de aproximadamente 25°C . El modelo predice un descenso de las temperaturas máximas durante la última etapa de colado, lo cual es coherente con lo esperado dado que los elementos finitos correspondientes a etapas previas se encuentran a temperaturas menores. En Figura 8 se ilustra la evolución de las temperaturas en nodos seleccionados (valores promedio). Los resultados del modelo numérico indican que los valores de temperaturas pico son muy cercanos a los límites recomendados en los códigos de construcciones (ACI 207 / CEB-FIP 90). Dado que el gradiente térmico oscila entre 20 y 25 grados centígrados, el riesgo de fisuración interna debe considerarse. En Figura 9 se aprecia la variación en el tiempo de las tensiones de tracción versus la resistencia admisible a la tracción del hormigón, comprobándose que para la secuencia constructiva considerada no existe riesgo de fisuración ya que la tensión máxima de tracción se mantiene alejada de la tensión admisible determinada por la evolución de las variables internas del modelo.

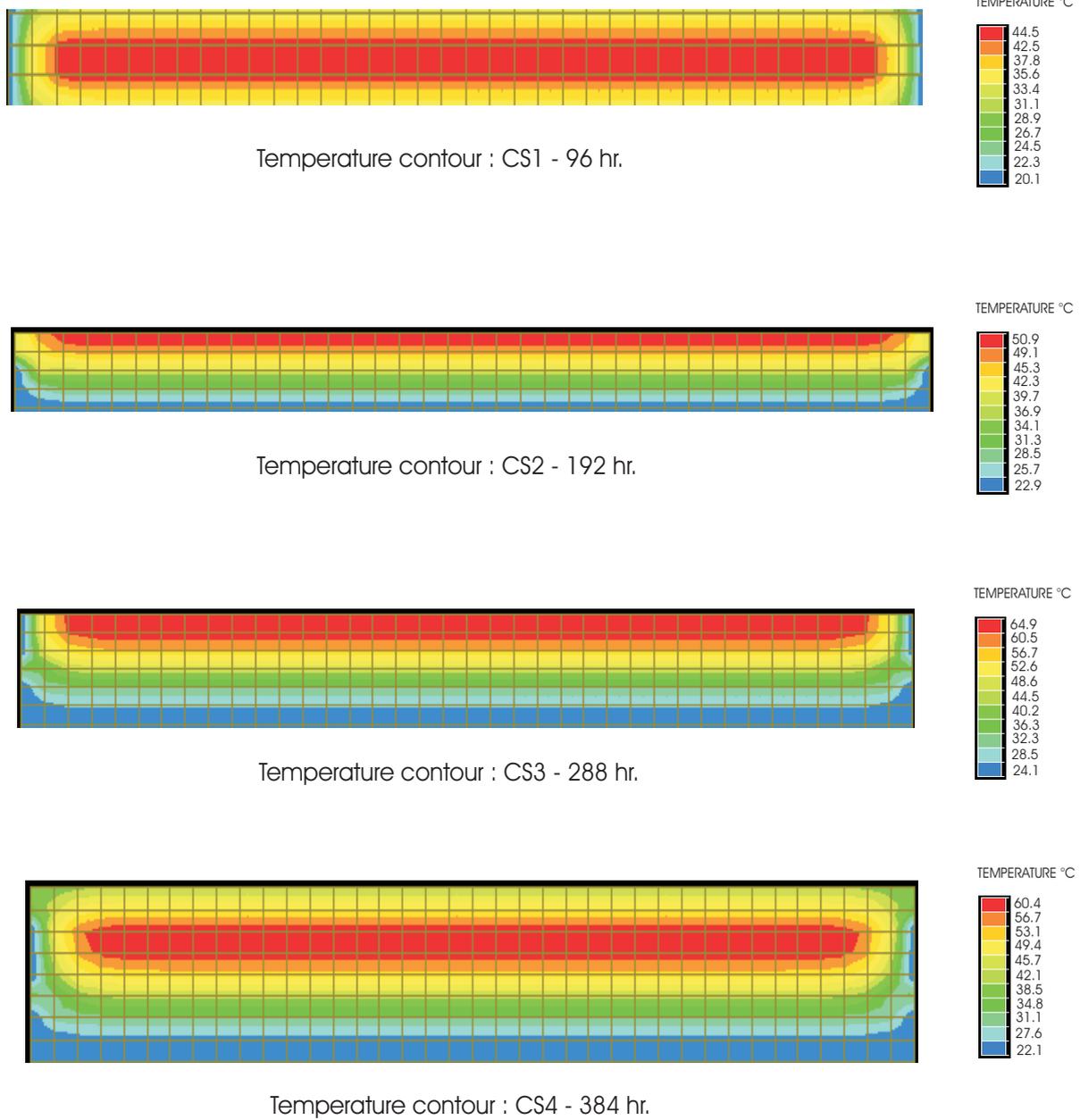


Figura 7. Proceso constructivo – evolución de temperaturas en el hormigón

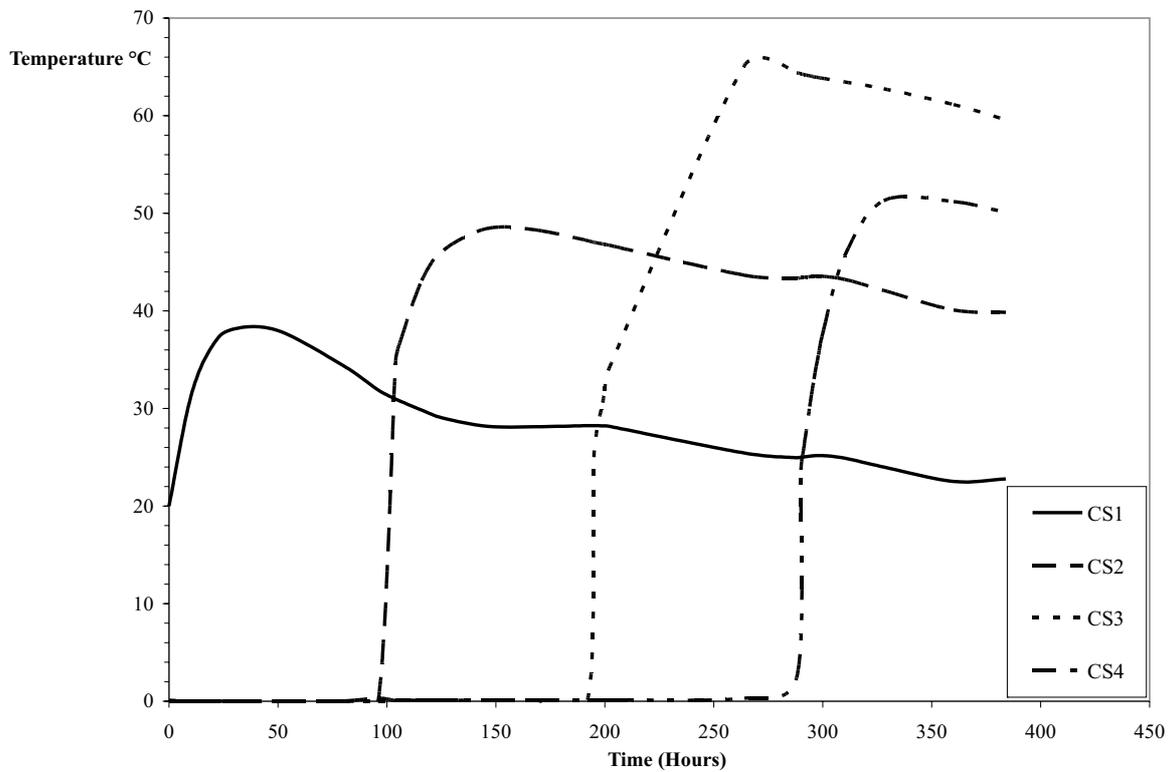


Figura 8. Evolución de temperaturas en función del tiempo (valores promedio)

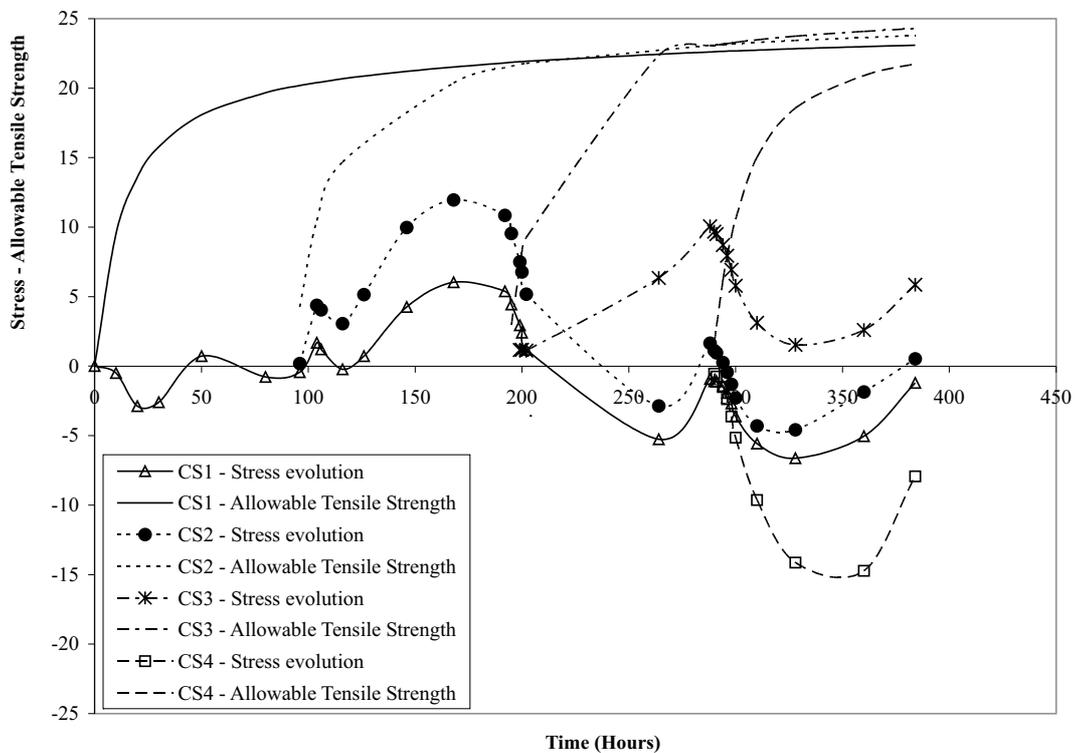


Figure 9. Tensiones térmicas y tensión admisible de tracción en función del tiempo

7 CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo numérico termo-químico elastoplástico acoplado capaz de predecir la variación de los parámetros materiales del hormigón en función de la evolución del proceso de maduración por fraguado en edades tempranas. El modelo constituye una herramienta computacional que permite el estudio del riesgo o potencial de fisuración en la masa del hormigón como consecuencia del desarrollo de gradientes térmicos internos. La evaluación del riesgo de fisuración se realiza considerando el modelo elastoplástico de Drucker-Prager con inclusión de términos de endurecimiento químico y mecánico. La estrategia de cálculo y la asignación de condiciones de borde adoptadas permite el estudio de los procesos de colado de estructuras masivas en términos de las características de la mezcla, etapas de construcción y condiciones ambientales imperantes, etc. posibilitando el planeamiento racional de las etapas de colado y la determinación de la necesidad de incorporar refuerzos de acero.

REFERENCIAS

- Cervera M., Oliver J. y Prato T., A thermo-chemo-mechanical model for concrete. *Publicación CIMNE N°146*: 1-25. Barcelona, España, 1998.
- Coussy, O., *Mechanics of porous continua*. J. Wiley and Sons, Chichester, U.K. 1996.
- Prato T., Cervera M. y Oliver J., Simulación numérica del proceso de hidratación del hormigón. *Publicación CIMNE N°114*: 1-55, Barcelona, España, 1997.
- Rizo Patrón M., Carosio A. y Etse G., Formulación consistente de un modelo termoquímico - elastoplástico acoplado para hormigones en edad temprana. *Mecánica Computacional*, Vol. XXII: 2109-2119, Bahía Blanca, Argentina, 2003.
- Rizo Patrón, M., Modelación termo-químico-elastoplástica para hormigón en edades tempranas. *Tesis de Magister en Ingeniería Estructural*. Universidad Nacional de Tucumán (UNT), San Miguel de Tucumán, Argentina, 2001.
- Rizo Patrón M. y Etse G., Sobre análisis de localización en hormigones a edad temprana. *Mecánica Computacional*, Vol. XIX: 251-256, Bariloche, Argentina, 2000.
- Ulm, F. J. and Coussy, O., Strength growth as chemo-plastic hardening in early age concrete. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 122, 1996.
- ACI COMMITTE 207, Massive concrete for dams and other massive structures. *American Concrete Institute Journal*: 273-309, 1970.
- ACI COMMITTE 207, Mass Concrete. *American Concrete Institute Manual of Concrete Practice*, 2002.
- ACI COMMITTE 207, Effect of restraint, volume change and reinforcement on cracking of mass concrete. *American Concrete Institute Manual of concrete practice*, 2002.
- ACI COMMITTE 207, Cooling and insulating systems for mass concrete. *American Concrete Institute, Manual of Concrete Practice*, 2002.
- CEB-FIP MC 90 (1993), Design of concrete structures. Código Modelo CEB-FIP 1990. Thomas Telford, 1993.