

ANÁLISIS TERMOQUIMICOMECAÍNICO DE ESTRUCTURAS MASIVAS DE HORMIGÓN EN EDADES TEMPRANAS

Cristian Barrera[†], Diego Celentano[‡], Patricio Cendoya[†] y Tomás Prato^{††}

[†] *Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Concepción
Concepción-CHILE*

[‡] *Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Santiago de Chile
Santiago-CHILE*

^{††} *E.T.S. de Caminos Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona-ESPAÑA*

RESUMEN

Se presenta en este trabajo un modelo termoquimicomecánico acoplado para describir el proceso de hidratación del hormigón a edades tempranas en estructuras masivas. Este modelo está formulado en el contexto de la teoría de los medios continuos porosos reactivos. En él se incluye una ley de evolución del grado de avance de la reacción exotérmica que rige la generación de calor y el cambio de algunas propiedades mecánicas tales como la resistencia a la compresión y tracción y el módulo de elasticidad. Se considera además un criterio de daño que permite establecer si el material se encuentra en el rango elástico o en proceso de deterioro. Este modelo se discretiza en el marco del método de elementos finitos. La solución del sistema de ecuaciones resultante se realiza por medio de un esquema alternado que preserva el grado de acoplamiento del modelo y permite resolver los problemas térmico, químico y mecánico de forma separada pero interdependiente. En el análisis numérico, se consideran los efectos de intercambio de calor con el aire e insolación y el método constructivo referido a la construcción por etapas por medio de capas, definiendo su espesor y el tiempo de espera en la colocación de las mismas. Se presenta la aplicación de este modelo a la losa de fundación del turbogenerador de la central termoeléctrica de Mejillones (II Región, Chile) validando experimentalmente la evolución de la temperatura. Por último, cabe mencionar que las constantes del modelo de hidratación fueron calibradas con las mediciones obtenidas de un ensayo adiabático disponible en la literatura.

ABSTRACT

A coupled thermochemomechanical model to describe the hydration process of massive concrete structures at early stages is presented in this work. This model, written in the framework of reactive porous continuous media theory, includes an evolution law for the exothermic reaction degree which governs the heat generation and the variation of some mechanical properties such as the compression and tension strengths and the elastic modulus. In order to predict the material mechanical response, elastic or non-reversible, a damage criterion is also considered. This model is discretized in the context of the finite element method. The solution of the resulting system of equations is achieved via a staggered scheme that allows to solve the thermal, chemical and mechanical problems separately but preserving the coupling degree. Convection-radiation heat transfer conditions with the environment, insolation effects and some particular features of the construction procedure are also considered in the numerical analysis. This model is applied to study the foundation of the turbogenerator of the thermoelectric complex of Mejillones (II Region, Chile) in which an experimental validation of the temperature evolution is performed. Finally, it is important to remark that the constants used in the hydration model were calibrated with experimental measurements available in the literature corresponding to an adiabatic specimen.

INTRODUCCIÓN

La hidratación del hormigón es un fenómeno muy complejo durante el cual se llevan a cabo diversas transformaciones microscópicas que en algunos casos no están aún completamente estudiadas. Este proceso cobra gran importancia en el estudio de estructuras de hormigón de considerables dimensiones. Dentro de los problemas más destacados que aparecen durante el proceso de fraguado, se puede mencionar la fisuración, que influye notablemente en la durabilidad y funcionalidad de las estructuras, lo que trae aparejado la aparición de presiones intersticiales, problemas de corrosión, filtraciones, etc.. Una forma de estudiar el problema es a través de la determinación de las propiedades mediante ensayos experimentales. Si bien la información que brindan estos ensayos es muy importante para el conocimiento de las características del hormigón a esta edad, también es cierto que, a menudo resulta muy difícil medir las propiedades termomecánicas de interés en el estudio, debido a las condiciones pastosas iniciales de la mezcla y el cambio de ellas en el tiempo, desde el hormigonado hasta el término del proceso de endurecimiento. Otra manera, alternativa y complementaria, de enfrentar el problema de hidratación del hormigón es por medio de la simulación numérica del fenómeno. Una opción posible está dada por una formulación termoquimicomecánica del problema dentro del marco de los métodos numéricos, ya que de esta forma se pueden obtener soluciones aproximadas para casos complejos utilizando hipótesis consistentes tan generales como se desee. Dentro de este último contexto se enmarca el presente artículo. No obstante, existen en la actualidad muchos trabajos sobre este tema, también es un hecho que todavía quedan muchos aspectos del problema que aún no han sido tratados. Se define el modelo en términos de una variable interna propia del fenómeno de hidratación que permite describir la evolución de la temperatura y de las propiedades mecánicas, resistencias a la compresión y tracción, y módulo de elasticidad, en función del grado de avance de la misma. Además, se incorpora un criterio de daño que permite indicar si el material ha entrado en deterioro o no. Se pretende, por lo tanto, que dicha descripción contribuya a un mejor conocimiento de los fenómenos que ocurren durante el proceso de hidratación y, además, que permita establecer ciertos criterios de diseño en la construcción de obras civiles.

MODELO TERMOQUIMICOMECAÁNICO PARA LA HIDRATACIÓN DEL HORMIGÓN

La ecuación de balance energético y las condiciones de contorno considerando un medio continuo y termoelasticidad isótropa del material, están dadas por^[1]:

$$\begin{aligned} -\rho c \dot{T} + \nabla \cdot \mathbf{k} \cdot \nabla(T) + \rho r + \rho L \dot{\xi} &= 0 & \text{en } \Omega \times \Upsilon & \quad (1) \\ \left\{ \begin{array}{l} T - \bar{T} = 0 \\ -\mathbf{k} \cdot \nabla(T) \cdot \mathbf{n} + \bar{q} - h(T - T_{ext}) = 0 \end{array} \right. & & \begin{array}{l} \text{en } \Gamma_T \times \Upsilon \\ \text{en } \Gamma_q \times \Upsilon \end{array} & \quad (2) \end{aligned}$$

donde ρ es la densidad del material, c el calor específico, \mathbf{k} el tensor de conductividad térmica, r es una fuente interna de calor, L el calor latente, ξ el grado de hidratación del hormigón, T la temperatura, \bar{T} la temperatura prescrita, \mathbf{n} el vector normal a la superficie, \bar{q} el flujo de calor normal prescrito, h el coeficiente de transferencia de calor, T_{ext} la temperatura ambiente, Ω , Γ_T , Γ_q e Υ representan, respectivamente, el dominio espacial, las fronteras donde está prescrita la temperatura y el flujo de calor y el intervalo de tiempo de análisis. El problema está asociado a la condición inicial para la temperatura $T(\mathbf{X}, t)|_{t=0} = T_o(\mathbf{X})$ y para el grado de hidratación $\xi(\mathbf{X}, t)|_{t=0} = \xi_o(\mathbf{X})$, ambas en Ω . El calor de hidratación es definido por la última expresión de la ecuación (1) y está en función del grado de avance de la reacción que se define como grado de hidratación y su tasa se expresa en $\Omega \times \Upsilon$, por^[3]:

$$\dot{\xi} = \frac{\kappa_\xi}{\eta_{\xi_o}} < \left(\frac{A_{\xi_o}}{\kappa_\xi \xi_\infty} + \xi \right) (\xi_\infty - \xi) > \exp\left(-\bar{\eta}_\xi \frac{\xi}{\xi_\infty} - \frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{con} \quad \xi_\infty = \frac{1.031 w/c}{0.194 + w/c} \quad (3)$$

donde ξ_∞ es el grado de hidratación a tiempo infinito, w/c la razón agua/cemento, η_{ξ_0} la viscosidad inicial de la mezcla, R la constante universal de los gases y E_a la energía de activación. Los parámetros: κ_ξ , A_{ξ_0} y $\bar{\eta}_\xi$ son constantes de calibración propias de cada hormigón.

El cambio en las proporciones relativas y de las propiedades físicas de los constituyentes básicos del hormigón durante la reacción química corresponde al fenómeno de envejecimiento, que a un nivel macroscópico se puede representar como el cambio en las propiedades mecánicas del material en función del grado de hidratación. Para esta caracterización se emplea la resistencia a la compresión del hormigón f^- , que permite la estimación de la resistencia a la tracción f^+ y del módulo de elasticidad E del material. La resistencia a la compresión se escribe, como^[3]:

$$f^- = \langle (\lambda_T)(\lambda_{f^-, \xi}) \rangle \xi f_\infty^- \quad \text{en} \quad \Omega \times \Upsilon \quad (4)$$

con:

$$\lambda_T = \left(\frac{T_T - T}{T_T - T_{ref}} \right)^{n_T} \quad \text{y} \quad \lambda_{f^-, \xi} = \begin{cases} \upsilon \xi & \text{si } \xi \leq \xi_{set} \\ \upsilon \xi + \vartheta & \text{si } \xi > \xi_{set} \end{cases} \quad (5)$$

donde T_{ref} es la temperatura de referencia para la cual se determina f_∞^- , T_T corresponde a la temperatura máxima a la cual puede ocurrir el endurecimiento y n_T es un parámetro de calibración. Notar que para $T \geq T_{ref}$ resulta $\lambda_T \leq 1$, así disminuye el incremento de la resistencia a la compresión, por el contrario, para $T < T_{ref}$ se tiene $\lambda_T > 1$, y el incremento aumenta. La expresión $\lambda_{f^-, \xi}$ distingue las etapas de fraguado y endurecimiento, en que ξ_{set} define la finalización de la primera y el inicio de la última, siendo υ y ϑ constantes de calibración. Por otro lado,

para la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad se tienen en $\Omega \times \Upsilon$, respectivamente, los siguientes modelos^[3]:

$$f^+ = \left(\frac{f^-}{f_\infty^-} \right)^{2/3} f_\infty^+ \quad \text{y} \quad E = \sqrt{f^-} \frac{E_\infty}{\sqrt{f_\infty^-}} \quad (6)$$

donde la evolución de la resistencia a tracción y del módulo de Young dependen de la evolución de la resistencia a compresión, siendo f_∞^+ y E_∞ los valores finales de las propiedades asociados a la temperatura de referencia T_{ref} .

Si bien este trabajo se ha desarrollado considerando un comportamiento lineal de hormigón, se presenta un criterio de daño que indica cuándo esta hipótesis deja de ser válida. Se define una tensión efectiva normalizada equivalente, tanto para estados de compresión o tracción, respectivamente, de acuerdo a^[3]:

$$\tau^\pm = \frac{1}{f^\pm} \sqrt{\bar{\sigma}^\pm : \mathbf{C}^\pm : \bar{\sigma}^\pm} \quad \text{en} \quad \Omega \times \Upsilon \quad (7)$$

donde $\bar{\sigma}$ es el tensor de tensiones efectivas, que en el caso de un material no dañado corresponde al tensor σ que se define en función de la deformación termoquímica, como^[1]:

$$\sigma = \sigma_o + \mathbf{D} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^T - \boldsymbol{\varepsilon}^Q) \quad \text{en} \quad \Omega \times \Upsilon \quad (8)$$

donde $\boldsymbol{\sigma}_o$ es el tensor de tensiones iniciales, \mathbf{D} es el tensor constitutivo y $\boldsymbol{\varepsilon}$, $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ y $\boldsymbol{\varepsilon}^Q$ son los tensores de deformación total, térmico y químico, respectivamente. En la ecuación (7) se tienen además, los tensores adimensionales \mathbf{C}^\pm , y las componentes de tracción y compresión del tensor de tensiones efectivas $\bar{\boldsymbol{\sigma}}^+$ y $\bar{\boldsymbol{\sigma}}^-$ que se definen en $\Omega \times \Upsilon$, según^[3]:

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}^+ = \langle \bar{\boldsymbol{\sigma}} \rangle = \sum_{j=1}^3 \langle \bar{\sigma}_j \rangle \mathbf{p}_j \otimes \mathbf{p}_j \quad \text{y} \quad \bar{\boldsymbol{\sigma}}^- = \langle \bar{\boldsymbol{\sigma}} \rangle = \sum_{j=1}^3 \langle \bar{\sigma}_j \rangle \mathbf{p}_j \otimes \mathbf{p}_j \quad (9)$$

donde $\bar{\sigma}_j$ denota el valor de la j -ésima tensión principal del tensor $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ y \mathbf{p}_j el vector unitario asociado a la dirección principal respectiva j . Los paréntesis $\langle \cdot \rangle$ son los de Macaulay, que para una variable genérica x , se escriben^{[1][3]}:

$$\langle x \rangle = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0 \\ x & \text{si } x > 0 \end{cases} \quad (10)$$

y los símbolos^{[1][3]}:

$$\langle x \rangle = \begin{cases} x & \text{si } x \leq 0 \\ 0 & \text{si } x > 0 \end{cases} \quad (11)$$

La determinación si el comportamiento del material es o no elástico se hace comparando los valores de las variables τ^\pm en cada tiempo con la unidad. Si $\tau^\pm \leq 1$, entonces se está en el rango elástico, mientras que, si $\tau^\pm > 1$, el hormigón se encuentra en proceso de deterioro. Se hace hincapié en que el estudio realizado sólo considera al material en el rango elástico y no se cuantifica el daño, sino que sólo se indica su existencia .

VALIDACIÓN NUMÉRICA DEL MODELO TERMOQUIMICOMECAÍNICO

Se realiza el análisis termoquimicomecánico de una estructura real de hormigón masivo construida in situ correspondiente a la losa de fundación del turbogenerador de la central termoeléctrica de Mejillones, Chile.

La calibración de los parámetros que intervienen en la caracterización del modelo termoquimicomecánico se hace sobre la base de los ensayo adiabáticos desarrollados por Khan et al^[4] en la Universidad de McGill de Montreal, Canadá. Se ensayaron, entre otras, probetas cilíndricas de hormigón H30. El ajuste se detalla en Barrera^[1], obteniéndose los siguientes valores para las constantes^[1]:

CONSTANTE	VALOR
ξ_∞	0.75
κ_ξ / η_ξ [1/s]	388.9
$\bar{\eta}_\xi$	7.5
$A_\xi / (\kappa_\xi \xi_\infty)$	1.33×10^{-4}
E_a / R	4000
ν	2.95
ζ	0.4
ξ_{set}	0.2
T_T [K]	373
T_{ref} [K]	294
n_T	0.42

Las propiedades termomecánicas del hormigón H30 de la losa son^[6]:

PROPIEDAD	VALOR
ρ [kg/m^3]	2400
c [$J/kg K$]	971
K [$J/m s K$]	1.5
α [$1/K$]	8×10^{-6}
ν	0.22

donde α es el coeficiente de dilatación térmica y ν el coeficiente de Poisson.

Las dimensiones en planta de la losa son de $30 m \times 12 m$ y para el espesor $2.5 m$ (profundidad), correspondientes a $900 m^3$ de hormigón (H30)^[6]. La geometría y sección de análisis de la losa se muestra en la Figura 1.

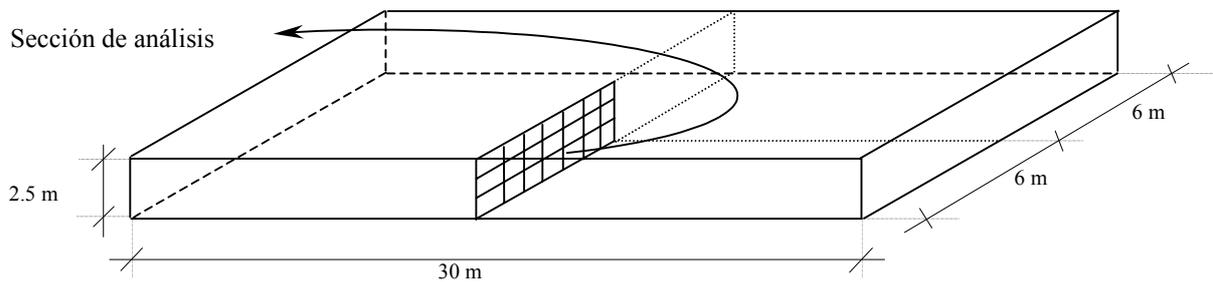


Figura 1: Geometría y sección de análisis ^[1].

El método constructivo de la losa corresponde a la colocación del hormigón en nueve capas horizontales mediante el sistema de hormigón bombeado. El espesor de las 7 primeras capas fue de $0.3 m$ y el de las 2 últimas de $0.2 m$. Se inicia el hormigonado el día 11/1/1994 y se termina el día 12/1/1994, completando 31 horas. Para las 7 primeras capas el intervalo de colocación fue de 3.5 horas y para las restantes de 3.25 horas. La medición experimental de la temperatura en el interior de la losa de hormigón, para una profundidad de $1.4 m$ (correspondiente a la cuarta capa), se llevó a cabo mediante la instalación de un sensor ubicado en un tubo de *PVC* enterrado en posición vertical en el centro (vista en planta) de la losa^[6]. La auscultación se realizó una vez terminada la obra.

Para el análisis numérico se considera un problema de deformación plana y simetría en el plano transversal (perpendicular a la dirección del lado mayor de la losa *zz*), con lo cual, la sección en estudio tiene las dimensiones $6 m \times 2.5 m$, según se indica en la Figura 2. Se prescribe una temperatura de $10 ^\circ C$ en la base de la fundación (contacto entre la roca y losa). Se modela la losa apoyada sobre la roca, restringiendo los desplazamientos horizontal y vertical y, en el eje de simetría se restringe el desplazamiento horizontal. La discretización espacial presentada en la Figura 2 corresponde a 164 elementos finitos, de los cuales 108 son de sólido bilineales de cuatro nodos isoparamétricos (12 por cada capa, 6 en la dirección horizontal y 2 en la vertical), que caracterizan el comportamiento térmico del hormigón y 54 elementos de contorno lineales de dos nodos isoparamétricos (6 sobre cada capa), que permiten el intercambio calórico entre el hormigón y el ambiente que lo rodea. Con estas consideraciones se modela el efecto que provocan la temperatura del aire y la insolación en el hormigón. El paso de tiempo adoptado para el cálculo es de $600 s$.

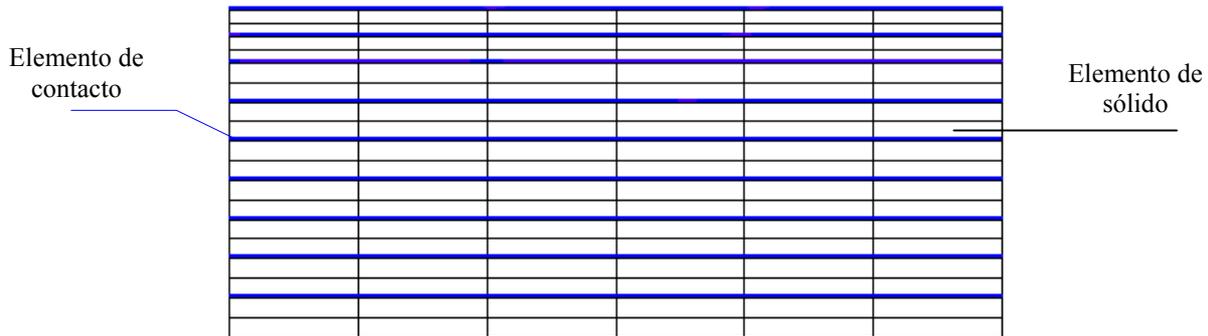


Figura 2: Geometría y sección de análisis ^[1].

Se supone que la losa se encuentra aislada en las paredes laterales, dado el mal intercambio de calor entre el hormigón y el aire, cuando el primero está bajo el nivel del suelo. Además, se ha prescrito una temperatura de 283 K en la zona en contacto con la roca.

En la Figura 3 se presenta la comparación de la auscultación experimental con los resultados obtenidos según el modelo numérico, para la temperatura de la losa a una profundidad de 1.4 m, correspondiente a la cuarta capa de la misma. Además, se muestra, la evolución de la temperatura para tres puntos ubicados en el interior de las capas 1, 3 y 9 de la losa. La temperatura en el interior de la 4 capa experimenta un incremento de aproximadamente 40 °C, comenzando a partir del cuarto día una disminución de la misma. La menor temperatura corresponde a la capa 1, dado que es la más afectada por la inercia térmica de la roca en la cual se ha prescrito una temperatura de 10 °C. Para un punto ubicado en la tercera capa se alcanza la mayor temperatura, esto se debe a que se encuentra más aislado; es decir, menos determinado por los efectos externos y particularmente condicionada por la generación de calor. Para un punto ubicado en la novena capa la historia de temperaturas depende en mayor medida de la transferencia de calor con el aire. Es importante destacar las pequeñas oscilaciones que se producen en esta curva debido a la variación diaria de la insolación.

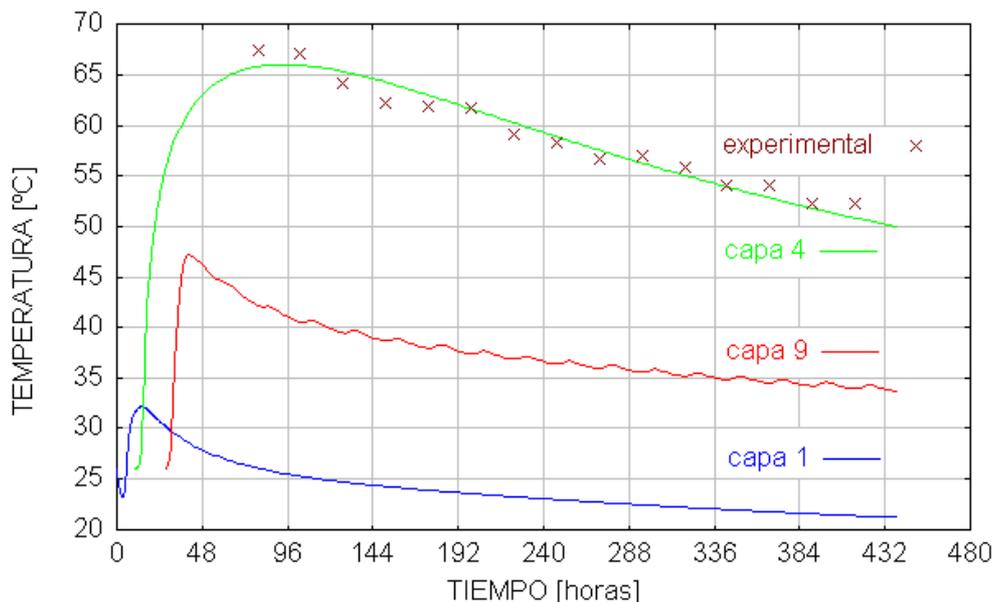


Figura 3: Evolución de la temperatura. Resultados numéricos ^[1] y experimentales ^[5].

Se presenta en la Figuras 4 y 5 el campo de temperaturas de la losa de fundación para 2 tiempos durante el proceso constructivo de la misma; dichos tiempos corresponden a: 21 horas (fin capa 6) y 31 horas (fin capa 9). Se ha representado el contorno final de la losa, para así tener una referencia del grado de avance del hormigonado de la losa. La distribución espacial de temperaturas para cada tiempo varía en el sentido de avance del hormigonado,

permaneciendo constante en la dirección horizontal. En las cercanías de ésta las temperaturas en la estructura son muy bajas, dado que se ven atenuadas por la inercia térmica de la misma. Las mayores temperaturas se obtienen en la zona central de la losa, dado que esos puntos se encuentran más aislados térmicamente. Los puntos situados cerca de la superficie, también se encuentran a bajas temperaturas, ya que se ven afectados por los factores externos, favoreciéndose la liberación de calor.

En las Figuras 6 y 7 se muestran los mapas de grado de hidratación, para los tiempos antes señalados (21 y 36 horas). Si bien el grado de hidratación aumenta con el tiempo, su tasa depende de la evolución de la temperatura (proceso termoactivado), por lo que en las cercanías de la roca, hidrata más lento. Por el contrario, hacia el centro de la losa la hidratación es mayor, pues la temperatura también lo es. Evidentemente en el extremo superior de la losa el grado de hidratación también es menor, pues es la última zona en hormigonar.

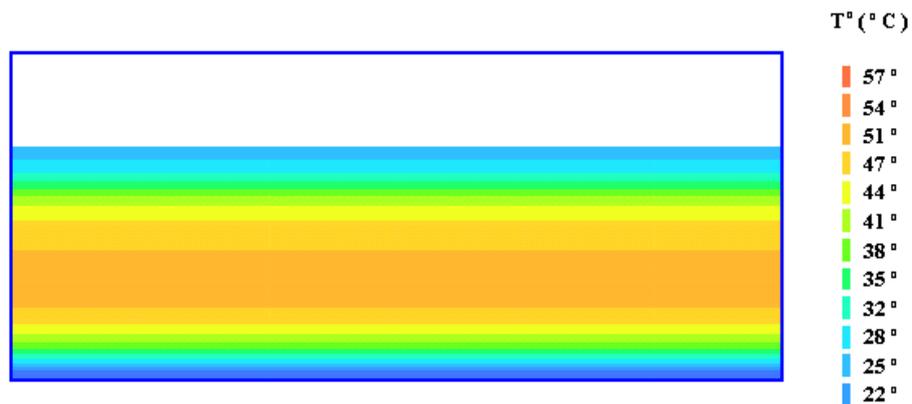


Figura 4: Campo de temperaturas para un tiempo de 21 horas. Resultados numéricos [1].

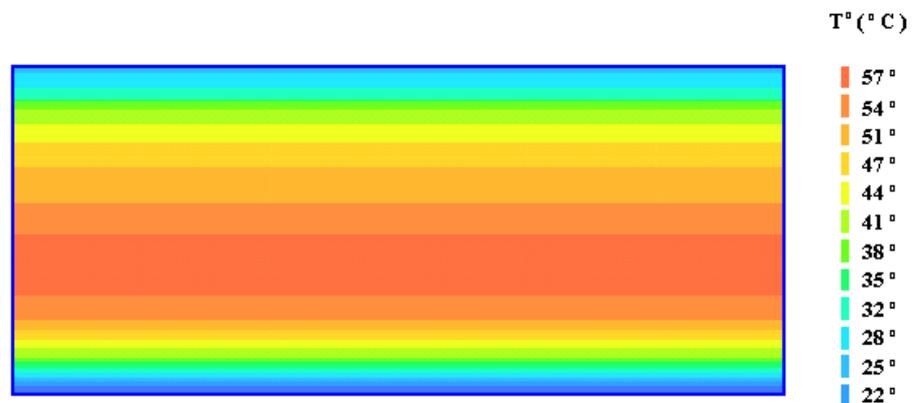


Figura 5: Campo de temperaturas para un tiempo de 31 horas. Resultados numéricos [1].

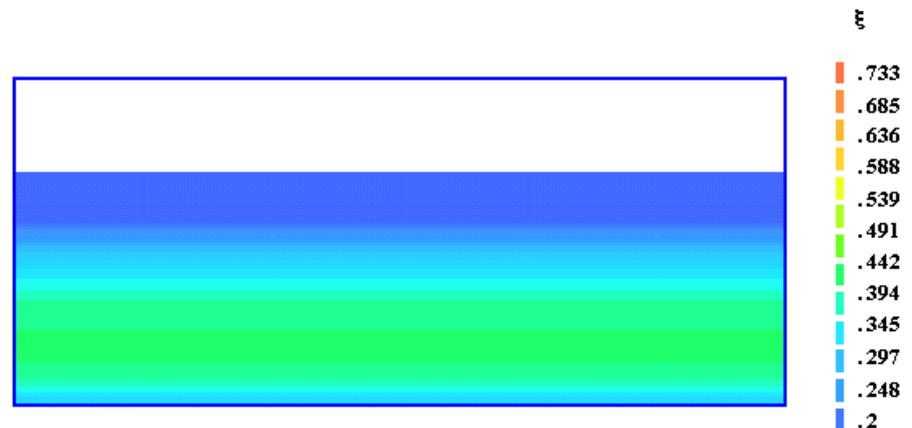


Figura 6: Campo del grado de hidratación para un tiempo de 21 horas. Resultados numéricos [1].

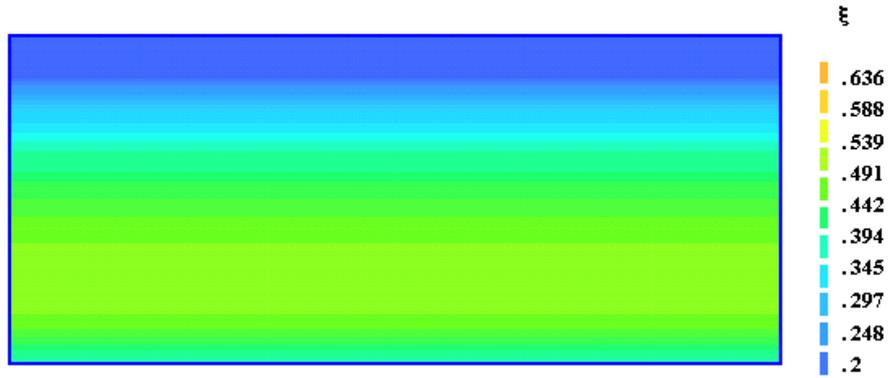


Figura 7: Campo del grado de hidratación para un tiempo de 31 horas. Resultados numéricos ^[1].

En las Figuras 8 y 9 se presenta la evolución de los parámetros del criterio de daño τ^- y τ^+ para un punto situado en el centro de la losa (quinta capa). Se analiza la influencia del coeficiente de contracción química β_ξ en dichos parámetros. Para ello se consideran 2 casos: 1) $\beta_\xi = 0$ y 2) $\beta_\xi = -8 \times 10^{-6}$. Se puede observar que ambos parámetros disminuyen su valor durante todo el período de análisis, para un β_ξ mayor (en valor absoluto); en consecuencia es más desfavorable considerarlo nulo. Esto se debe a que la evolución de ξ genera contracciones en el material que contrarrestan las dilataciones térmicas provocando, entonces, un menor estado tensional. Nótese que, para un punto existen dilataciones térmicas aún si su temperatura disminuye, siempre y cuando ésta sea superior a la temperatura inicial del hormigón. El crecimiento y descenso de τ^- y τ^+ son básicamente atribuibles, por un lado, al cambio de temperatura que genera gradientes térmicos y condicionan el estado tensional y, por otro, el descenso se debe a que las resistencias a la compresión y tracción crecen con el transcurso del tiempo debido al proceso de envejecimiento. La insolación tiende a reducir las tracciones en los puntos cercanos a los contornos y, por ende, este efecto se refleja en la curva τ^+ v/s t.

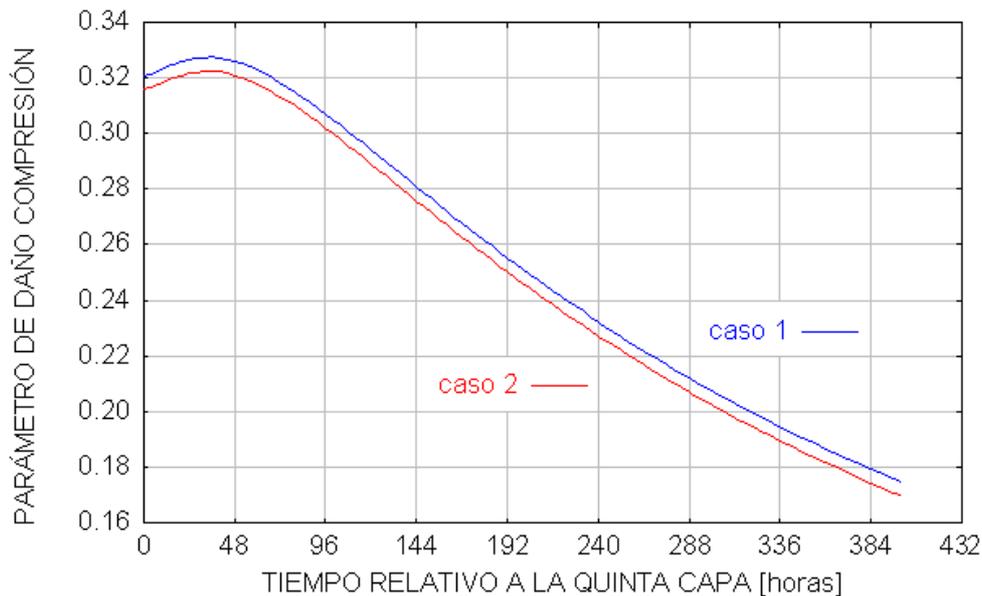


Figura 8: Evolución de τ^- . Resultados numéricos ^[1].

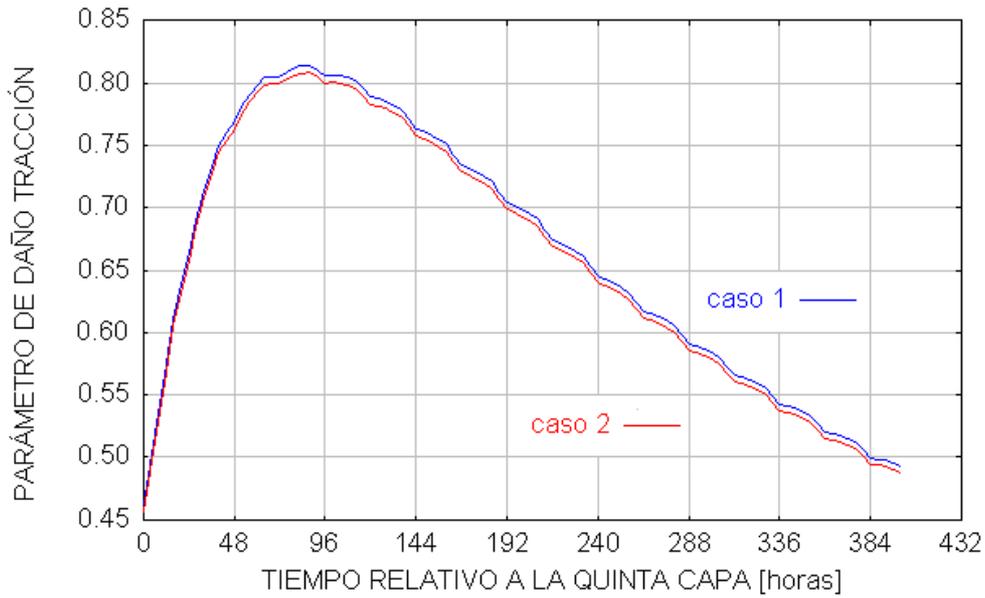


Figura 9: Evolución de τ^+ Resultados numéricos ^[1].

En las Figuras 10, 11, 12 y 13 se muestran los mapas de los parámetros del criterio de daño τ^- y τ^+ , para las 21 y 31 horas, respectivamente. En la dirección perpendicular al plano de deformación plana (dirección zz) el hormigón está comprimido en todo punto de la estructura. En particular τ^- toma valores mayores en el núcleo de la losa, esto se debe a que en el centro de la sección de análisis las temperaturas son mayores que en la periferia, por lo que en el núcleo hay mayor dilatación y, por ende, compresión en dicha zona. Además, en la dirección horizontal (dirección xx) las diferencias de temperaturas entre las capas (siendo mayores en las interiores) provocan compresiones en la zona central de la losa; esto se debe a que para dos capas consecutivas la temperatura de la capa inferior es mayor que la superior, debido al fenómeno de hidratación. Como consecuencia, esta diferencia de temperaturas entre las capas genera tracciones en las capas exteriores, razón por la cual los máximos de τ^+ se producen en los contornos. Por otro lado, en la base de la losa la temperatura inicial del hormigón es mayor que la temperatura de la roca por lo que se genera una contracción térmica (variación de temperatura $\Delta T < 0$) que trae aparejada tracciones en dicha zona.



Figura 10: Campo de τ^- para un tiempo de 21 horas. Resultados numéricos ^[1].

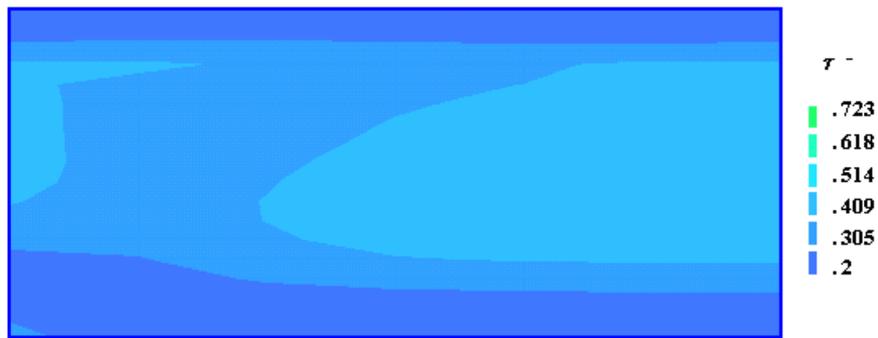


Figura 11: Campo de τ^- para un tiempo de 31 horas. Resultados numéricos ^[1].

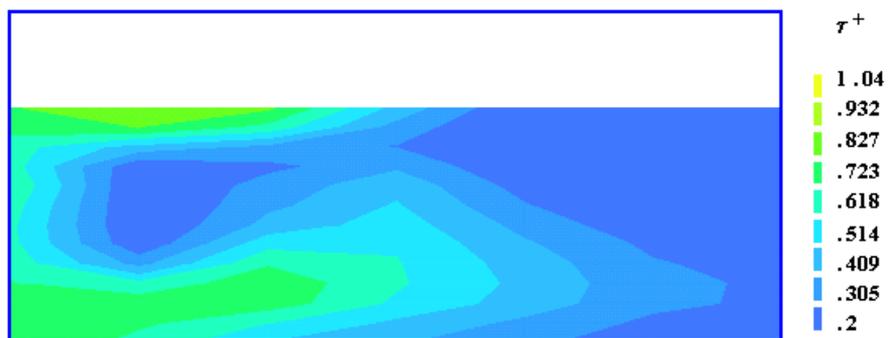


Figura 12: Campo de τ^+ para un tiempo de 21 horas. Resultados numéricos ^[1].

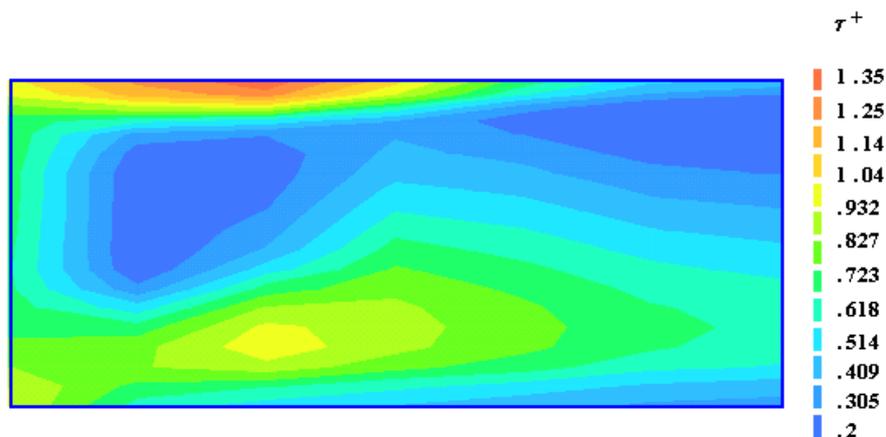


Figura 13: Campo de τ^+ para un tiempo de 31 horas. Resultados numéricos ^[1].

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta la aplicación de un modelo termoquimicomecánico para simular numéricamente el comportamiento a edades tempranas de la losa de fundación del turbogenerador de la central termoeléctrica de Mejillones, II Región, Chile. Dicho modelo permite obtener la evolución de las distribuciones de temperatura, grado de hidratación y parámetros τ^- y τ^+ , debidos al proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón, considerando el método constructivo por etapas y los efectos de intercambio de calor con el ambiente y la insolación. La reproducción de los resultados de temperatura en el centro de la losa es muy satisfactoria. Las zonas cercanas a la periferia de la estructura son susceptibles de agrietamiento por tracción, en tanto que, el núcleo está expuesto a la

falla por compresión, siendo la probabilidad de ocurrencia de esta última mucho menor que la anterior. Esta tendencia es directamente proporcional al volumen de hormigón, cantidad y tipo de cemento y, particularmente influenciada por las condiciones climáticas de la región donde se emplazará la obra.

El modelo, cuya formulación se sustenta sobre la base de los principios termodinámicos de la teoría de los medios continuos, es potencialmente aplicable al diseño de estructuras de hormigón masivo, permitiendo barajar diferentes espesores de las capas y tiempos de espera en la colocación de las mismas, y también cuantificar la influencia en la evolución de la temperatura y otras propiedades mecánicas del tipo y cantidad de cemento en la mezcla.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Concepción, a través del Proyecto P.I. N°: 97.091.026-1.0.

REFERENCIAS

- [1] Barrera Cristian, *Análisis Termoquimicomecánico de Estructuras de Hormigón en Masa. Aplicación a la Construcción de Presas de Gravedad*, Memoria de Título, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile, Mayo, 1999.
- [2] Celentano Diego, *VULCAN. Thermal and Coupled Thermochemomechanical Finite Element Analyses for Solidification Problems*, Users' Manual, Version 2.0, September, 1993.
- [3] Cervera Miguel, Oliver Javier and Prato Tomás, *A Thermo-Chemo-Mechanical Model for Concrete.II: Damage and Creep*, Publicación CIMNE No 146, UPC, Barcelona, España, 1998.
- [4] Coussy Oliver, *Mechanics of Porous Continua*, John Wiley and Sons Ltda., Chichester, England, 1995.
- [5] Khan A., Cook W. and Mitchell D. *Early Age Compressive Stress-Strain Properties of Low-Medium and High-Strength Concretes*, ACI Materials Journal, Vol.92, No 6, pp. 917-624, 1995.
- [6] Pulido Rodrigo, *Estudio del Desarrollo de Temperaturas en el Interior de Bloques de Hormigón de Grandes*