

# Modelo Termo-Mecánico para el Análisis de Estructuras de Hormigón a Edades Tempranas

**Resumen:** Se presenta un modelo numérico para estudiar el comportamiento del hormigón a edades tempranas. Se analizan los fenómenos de hidratación del cemento, variación de temperatura, evolución de propiedades mecánicas y respuesta del material ante las tensiones generadas. Se plantea un modelo constitutivo macroscópico del comportamiento del hormigón basado en el grado de hidratación. Para dar solución al problema, las ecuaciones diferenciales de gobierno se discretizan espacialmente mediante el método de elementos finitos y temporalmente mediante un esquema de diferencias finitas, tomando en cuenta condiciones iniciales y de contorno que permitan un análisis realista de las condiciones de ejecución del hormigón. La investigación se centra en poder contar con una herramienta capaz de modelar el fenómeno en dos y tres dimensiones, para optimizar el diseño y construcción de estructuras masivas de hormigón, donde el potencial de fisuración es elevado. Los resultados son constatados mediante ensayos in-situ y en laboratorios.

**Palabras Claves:** Hormigón; Temperatura; Hidratación; Daño.

**Abstract:** A numerical model is presented to study the behavior of concrete at early ages. The cement hydration, temperature variation, evolution of the mechanical properties and the material response induced by thermal stresses are analyzed. A macroscopic constitutive model for the concrete behavior based on the degree of hydration is proposed. The differential governing equations are spatial and temporally discretized through the finite element method and finite difference method, respectively, considering initial and boundary conditions that allow a realistic analysis of the concrete placement. The research focuses on the developing of a computational tool that should be able to model the phenomenon in two and three dimensions, in order to optimize the design and construction of massive concrete structures, where cracking potential is high. The results are verified through laboratory and field tests.

**Keywords:** Concrete; Temperature; Hydration; Damage.

José I. Croppi <sup>1</sup>, Pablo J. Sánchez <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería (GIMNI) - Universidad Tecnológica Nacional FR Santa Fe, Lavaisse 610, Santa Fe, 3000, Argentina,.

<sup>2</sup>Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC) - Universidad Nacional del Litoral - CONICET, Colectora Ruta Nac Nr. 168, Km 0, Paraje El Pozo, Santa Fe, 3000, Argentina. Te: 4511594/95, Fax 4511169.

Mail: <sup>1</sup>jcroppi@frsf.utn.edu.ar - <sup>2</sup>psanchez@intec.unl.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

La respuesta del hormigón ante las transformaciones térmicas que experimenta en el proceso de su hidratación es un factor predominante en la fisuración a edades tempranas. La hidratación del hormigón es un fenómeno muy complejo en el cual se llevan a cabo procesos microscópicos que son difíciles de estudiar. El proceso cobra gran importancia en el estudio de estructuras de hormigón masivas, en las cuales gran parte del material se encuentra en condiciones cuasi-adiabáticas, derivando en grandes variaciones de temperaturas. Una consecuente fisuración puede influir notablemente en la durabilidad y funcionalidad de estas estructuras (Crespo, 2011).

Una forma de estudiar el problema es mediante ensayos experimentales. Por otro lado, se puede encarar el mismo por medio de simulaciones numéricas como en el modelo aquí planteado. De esta forma se obtienen soluciones aproximadas para casos complejos, utilizando hipótesis consistentes desde una perspectiva macroscópica.

Este trabajo propone un análisis numérico de origen térmico y mecánico que permite caracterizar su interacción y obtener la evolución y distribución de temperaturas y de propiedades mecánicas en estructuras de hormigón a edades tempranas. La metodología básica se fundamenta en la definición de una variable interna que representa el grado de hidratación en cada punto de estructura de hormigón y para cada instante de análisis.

En cuanto al análisis térmico, la reacción de hidratación del hormigón es una reacción no lineal y altamente exotérmica. La misma provoca un notable aumento de temperaturas que se acentúa en condiciones cuasi-adiabáticas, como sucede en el interior de estructuras masivas de hormigón. Las deformaciones volumétricas inducidas provocan gradualmente mayores tensiones a medida que el hormigón se endurece. Debido a la baja conductividad térmica del material, una distribución de temperaturas no uniforme, fenómenos de intercambio

de calor con el ambiente juntamente con restricciones de deformación volumétricas tanto internas como externas, se pueden producir estados tensionales que incluyan tracción, sollicitación para la cual el hormigón presenta escasas prestaciones de resistencia, derivando en fisuraciones si no son controladas.

En lo que respecta al análisis mecánico, el hormigón es un material conglomerado y con propiedades heterogéneas, lo cual deriva en un comportamiento mecánico complejo y altamente no lineal. Es por esto que se hace necesario emplear modelos constitutivos que contemplen la diferencia de resistencia a tracción y compresión, la recuperación de rigidez ante cambios de signo en tensiones y las deformaciones permanentes ante descarga. En el presente trabajo se utiliza un Modelo de Daño Continuo (Cervera et. al., 1999a). El mismo tiene gran aplicación en diversos casos por su simplicidad y versatilidad, como así también por su consistencia termodinámica. El daño se plantea utilizando dos variables internas escalares que caracterizan el daño local a tracción y compresión. Se contempla el comportamiento no lineal del hormigón, incluyendo la reducción de rigidez por cambio de signo de tensiones e incorporando la capacidad de modelar el ablandamiento por deformaciones.

Tanto los fenómenos térmicos como mecánicos interactúan entre sí de forma significativa, por lo que se debe plantear un acoplamiento entre los dos modelos.

Para conocer el potencial de fisuración se estudia el comportamiento estructural a corto plazo incluyendo los resultados del modelo térmico, las variaciones en el tiempo tanto de la resistencia como de la rigidez del material.

El planteamiento del problema incluye la solución de las ecuaciones diferenciales de gobierno con las correspondientes condiciones iniciales y de contorno, permitiendo incluir de forma realista las condiciones ambientales y de ejecución de la estructura. Se plantean

esquemas de discretización espacial y temporal que permitan la solución del problema de forma eficiente.

## METODOLOGÍA

La metodología numérica no se aplica a la forma fuerte del problema, sino a la forma variacional del mismo. La no linealidad del problema, tanto para el análisis térmico como para el mecánico, se resuelve mediante la estrategia iterativa de Newton-Raphson. La discretización espacial se realiza por el método de elementos finitos y la discretización temporal, mediante un esquema implícito de integración Backward-Euler basado en diferencias finitas.

Se propone una aproximación por elementos finitos lineales, triangulares para 2D y tetraédricos para 3D.

### Modelo Térmico

La formulación teórica de generación y conducción de calor en el hormigón que se produce durante la hidratación del cemento conduce a un problema en derivadas parciales transitorio no lineal, al que se le aplican condiciones iniciales y de contorno.

El problema de conducción de calor transitorio con término fuente en un medio continuo que abarca un dominio  $\Omega$ , está gobernado por la ecuación nro. 1 (Cervera et al., 1999a).

$$\rho c_e \dot{\phi} - k \Delta \phi = \dot{Q} \text{ en } \Omega \tag{1}$$

donde  $\Delta$  es el operador laplaciano,  $\phi$  es la temperatura y los parámetros  $\rho$ ,  $c_e$  y  $k$  son la densidad, el calor específico y la conductividad térmica, respectivamente, que dependen del material. El término fuente es representado por  $\dot{Q}$  el cual es función del grado de hidratación del cemento.

Las etapas constructivas son activadas y consideradas

en el análisis según tiempos preestablecidos. A su vez, se introduce una interfaz de contacto entre las distintas etapas, para contar con la posibilidad de establecer una condición de convección con el ambiente cuando no esté activa la etapa constructiva subsecuente o bien una condición de conducción cuando ésta sí se active.

Las condiciones de borde se describen en términos de las ecuaciones siguientes:

$$\phi = \bar{\phi} \text{ en } \Gamma_\phi \tag{2}$$

$$-k \frac{\partial \phi}{\partial n} = \bar{q} \cdot n \text{ en } \Gamma_N \tag{3}$$

$$\bar{q} \cdot n = h(\phi - \phi_{ref}) \tag{4}$$

Donde  $\Gamma_\phi$  y  $\Gamma_N$  son las fronteras del dominio  $\Omega$  de tipo Dirichlet (2) y de tipo Neumann (3), definidas de manera tal que  $\Gamma_\phi \cup \Gamma_N = \Gamma$  y  $\Gamma_\phi \cap \Gamma_N = \emptyset$ ,  $\bar{\phi}$  representa un campo de temperaturas impuestas conocidas,  $n$  es el vector saliente normal a  $\Gamma$  y  $\bar{q}$  representa flujos impuestos en la frontera tipo Neumann (3). El intercambio de flujo entre el sólido y el exterior también se considera mediante la ecuación (4) que representa una condición de convección. Allí interviene un coeficiente de convección  $h$ , la variable de temperatura de cálculo  $\phi$  y una temperatura de referencia conocida  $\phi_{ref}$  mediante la cual se tiene en cuenta la influencia de la temperatura ambiente exterior, variable en el tiempo.

Las condiciones iniciales de cada etapa se toman en cuenta mediante la siguiente expresión:

$$\phi(x, t = 0) = \phi_0(x) \text{ en } \Omega \tag{5}$$

donde  $\phi_0(x)$  representa la distribución inicial de temperaturas que en general coincide con la temperatura de colado de cada etapa.

Para tomar en consideración el término fuente de generación de calor se asume como mecanismo dominante

de hidratación del cemento una variable interna llamada grado de hidratación, que describe la relación del agua en la reacción con los hidratos ya formados. Su ley de evolución es calibrada y permite calcular de forma adecuada la producción del calor de hidratación caracterizada por el término fuente  $Q$  (De Schutter et al., 1996).

El modelo propuesto considera varias expresiones para representar el término fuente. En este trabajo se implementa el modelo propuesto por Cervera (Cervera et al., 1999a), ya que fue el utilizado en los ejemplos de referencia que se presentan. Los parámetros intervinientes se obtienen de ensayos experimentales. El cálculo parte de suponer la siguiente relación para el término de generación de calor en la masa de hormigón:

$$\dot{Q} = Q_{\xi} \dot{\xi} \tag{6}$$

El parámetro  $Q_{\xi}$  puede obtenerse mediante un experimento adiabático, mientras que la evolución de la variable normalizada denominada grado de hidratación  $\xi$  está dada por la ecuación siguiente:

$$\dot{\xi} = \frac{k_{\xi}}{\eta_{\xi 0}} \left( \frac{A_{\xi 0}}{k_{\xi} \xi_{\infty}} + \xi \right) (\xi_{\infty} - \xi) \dots \dots \exp \left( -\tilde{\eta} \frac{\xi}{\xi_{\infty}} \right) \exp \left( -\frac{E_a}{R\phi} \right) \tag{7}$$

donde  $E_a$  es la energía de activación,  $R$  la constante de Boltzmann. Los restantes parámetros son:  $A_{\xi 0}$  la afinidad química inicial,  $\eta_{\xi 0}$  y  $\tilde{\eta}$  las viscosidades, y  $k_{\xi}$  una constante del material. En dicha expresión interviene el valor final del grado de hidratación que se obtiene como sigue:

$$\xi_{\infty} = \frac{1.031 \frac{w}{c}}{0.194 + \frac{w}{c}} \tag{8}$$

siendo  $\frac{w}{c}$  la relación agua-cemento de la mezcla.

### Modelo Mecánico

En primer lugar, se analiza el envejecimiento del material según el procedimiento presentado por Cervera (Cervera et al., 1999a). En este proceso, cambian las propiedades mecánicas de los componentes del hormigón debido a la reacción química. Particularmente se analiza la evolución de su resistencia a tracción, y a compresión, y de su módulo de elasticidad. El modelo de envejecimiento planteado considera las propiedades mecánicas como variables internas, que evolucionan en función del grado de hidratación y de la temperatura en el material.

La resistencia a compresión se utiliza comúnmente como parámetro de caracterización del hormigón, permitiendo obtener la resistencia a tracción y el módulo elástico a partir de ésta. Se introduce una variable interna de envejecimiento,  $\kappa$ , la que permite expresar la evolución de la resistencia a compresión de la siguiente manera:

$$f^{-}(\kappa) = \kappa f_{\infty}^{-} \tag{9}$$

donde  $f_{\infty}$  es el valor final de resistencia a compresión. El grado de envejecimiento se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\kappa = \lambda_T(\phi) \lambda_f^{-}(\xi) \quad \kappa \geq 1 \tag{10}$$

El primer término  $\lambda_T(\phi)$  incluye de forma explícita la influencia de la temperatura de curado, que influye en la cinética de hidratación en el envejecimiento. Se propone para su cálculo la siguiente expresión:

$$\lambda_T = \left( \frac{\phi_T - \phi}{\phi_T - \phi_{ref}} \right)^{n_T} \tag{11}$$

donde  $\phi_{ref}$  es la temperatura de referencia para la determinación de  $f_{\infty}$ ,  $\phi_T$  representa la máxima temperatura a la cual puede fraguar el hormigón y  $n_T$  es una propiedad del material que controla la sensibilidad respecto a la temperatura de curado.

Por otro lado,  $\lambda_f(\xi)$  representa la relación entre la variación de resistencia y la variación del grado de hidratación. Se supone la misma como una expresión parabólica de  $\xi$ . Su derivada temporal se puede expresar de la forma:

$$\dot{\lambda}_f^-(\xi) = \lambda_{f,\xi}^-(\xi) \dot{\xi} = (A_f \xi + B_f) \dot{\xi} \quad (12)$$

Donde  $\xi_{set}$  es el límite de percolación que define el final de la fase de fraguado, que usualmente se encuentra comprendido entre los valores 0.1 y 0.4 (De Schutter et al., 1996).

Para  $\xi \leq \xi_{set}$  se considera:

$$A_f = \frac{2f_{set}^-}{f_{\infty}^- \xi_{set}^2} \quad ; \quad B_f = 0 \quad (13)$$

Para  $\xi \geq \xi_{set}$  se adoptan:

$$A_f = 2 \left( \frac{\frac{f_{\infty}^-}{\xi_{\infty}^-} - \frac{f_{set}^-}{\xi_{set}^-}}{\xi_{\infty}^- - \xi_{set}^-} \right) / f_{\infty}^- \quad (14)$$

$$B_f = \frac{f_{\infty}^-}{\xi_{\infty}^-} - \xi_{\infty}^- \left( \frac{\frac{f_{\infty}^-}{\xi_{\infty}^-} - \frac{f_{set}^-}{\xi_{set}^-}}{\xi_{\infty}^- - \xi_{set}^-} \right) / f_{\infty}^- \quad (15)$$

Finalmente, la derivada temporal del grado de envejecimiento es:

$$\dot{\kappa} = \lambda_T(\phi) \lambda_{f,\xi}^-(\xi) \dot{\xi} \quad (16)$$

Esta expresión muestra la dependencia de la variable de envejecimiento tanto del grado de hidratación como de la temperatura. En general, el envejecimiento de las

propiedades mecánicas responde a la siguiente figura, que muestra las curvas de evolución de la resistencia a compresión, la resistencia a tracción y el módulo elástico, en parámetros normalizados, según el grado de envejecimiento (Cervera et al., 1999a).

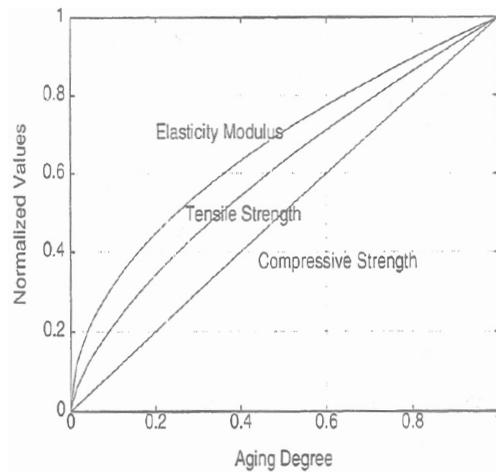


Fig. 1: Evolución de propiedades mecánicas.

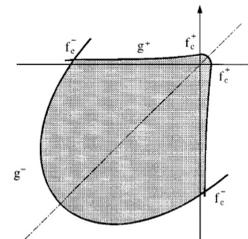


Fig. 2: Criterio de daño.

Con el modelo de envejecimiento se procede a analizar en el módulo mecánico el comportamiento a corto plazo del hormigón, en base a la Teoría de la Mecánica del Daño Continuo en un formato normalizado, empleando variables escalares diferenciadas para representar el daño a compresión y a tracción (Cervera et al, 1999a).

Esta teoría utiliza el concepto de tensión efectiva. La misma se define como sigue: la deformación asociada a un estado dañado bajo una tensión  $\sigma$  aplicada es equivalente a la deformación asociada al estado no dañado sometida a una tensión efectiva  $\sigma_e$ . En este caso se calcula como sigue:

$$\bar{\sigma}(\varepsilon_e, \kappa) = \mathbf{D}(\kappa) : \varepsilon_e \tag{17}$$

donde  $\xi_e$  es el tensor de segundo orden de deformaciones elásticas,  $\mathbf{D}(k)$  es el tensor constitutivo elástico lineal y  $(:)$  indica doble contracción.

El tensor de tensiones se divide en sus respectivas componentes de tracción y compresión según el signo + y - respectivamente. Esta partición se resuelve de la siguiente forma:

$$\bar{\sigma}^+ = \langle \bar{\sigma} \rangle = \sum_{j=1} \langle \bar{\sigma}_j \rangle \mathbf{p}_j \otimes \mathbf{p}_j \tag{18}$$

$$\bar{\sigma}^- = \rangle \bar{\sigma} \langle = \sum_{j=1}^3 \rangle \bar{\sigma}_j \langle \mathbf{p}_j \otimes \mathbf{p}_j \tag{19}$$

donde  $\sigma_j$  es el j-ésimo valor principal de tensión del tensor  $\sigma$ ,  $\mathbf{p}_j$  representa el vector unitario asociado a su respectiva dirección principal y el símbolo  $\otimes$  es el producto tensorial. Los símbolos  $\langle$  y  $\rangle$  son los paréntesis de Macaulay.

La ecuación constitutiva del modelo de daño se obtiene utilizando el procedimiento de Coleman:

$$\sigma = (1 - d^+) \bar{\sigma}^+ + (1 - d^-) \bar{\sigma}^- \tag{20}$$

Se introducen dos variables internas  $d^+$   $d^-$  y que son los índices de daño a tracción y compresión respectivamente.

La caracterización del daño se realiza a través de una magnitud escalar positiva, denominada tensión equivalente normalizada, que permite comparar diferentes estados tensionales entre sí. Con esta definición, distintos estados de tensión pueden relacionarse con un único experimento uniaxial normalizado, haciendo posible su comparación. Por la partición de tensiones, se necesitan dos normas separadas de tensión efectiva equivalente para tracción y compresión. Las mismas se definen como:

$$\tau^\pm = \frac{1}{f_e^\pm} [\bar{\sigma}^\pm : \mathbf{C}^\pm : \bar{\sigma}^\pm]^{1/2} \tag{21}$$

donde  $\mathbf{C}^\pm$  son tensores métricos adimensionales de cuarto orden que no dependen del grado de envejecimiento. Su función es definir la forma de las superficies envolventes de daño en un espacio normalizado de tensiones efectivas. Los mismos son isótropos y definidos positivos. Su estructura es la siguiente:

$$\mathbf{C}^\pm = (1 + \gamma^\pm) \mathbf{I} - \gamma^\pm \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} \tag{22}$$

donde  $\mathbf{I}$  es el tensor unidad de cuarto orden, es el tensor unidad de segundo orden y  $\gamma^\pm$  es un parámetro relacionado con las resistencias equibiaxiales a tracción/compresión que toma valores entre 0 y 1, siendo definido por:

$$\gamma^\pm = 1 - \frac{1}{2(\rho^\pm)^2} \tag{23}$$

Un criterio realista para el hormigón que se utiliza en este trabajo es con  $\rho^\pm = 1,15$ , por lo que  $\gamma^\pm = 0,622$  (Ver Figura 2).

Con estas definiciones se introducen dos criterios de daño separados para tracción y compresión:

$$g^\pm(\tau^\pm, r^\pm) = \tau^\pm - r^\pm \leq 0 \tag{24}$$

Las  $r^\pm$  son variables internas tipo deformación normalizadas y se pueden interpretar como "umbrales de daño", siendo su valor el que controla el tamaño de las superficies de daño en el espacio normalizado. Sus valores iniciales son unitarios  $r_0^\pm = 1$ .

La evolución de las superficies de daño en el espacio normalizado en las dos condiciones: carga y descarga, derivan de una condición de consistencia de daño que se puede escribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{r}^\pm &\geq 0 & g^\pm &\leq 0 \\ \dot{r}^\pm g^\pm &= 0 & \dot{r}^\pm \dot{g}^\pm &= 0 \end{aligned} \tag{25}$$

Estas relaciones determinan la condición de carga  $r^{\pm}$  que lleva a la determinación cerrada de los valores de la variable interna  $r^{\pm}$  como sigue:

$$r^{\pm} = \max[r_0^{\pm}, \max(\tau^{\pm})] \tag{26}$$

La variable  $\tau^{\pm}$  depende explícitamente de los valores actuales de las deformaciones, la temperatura y el grado de envejecimiento. Seleccionando el máximo valor entre  $r_0^{\pm}$  y  $\tau^{\pm}$  se obtienen los valores actuales de  $r^{\pm}$ .

Las funciones de evolución de daño que se utilizan en este trabajo, tanto para compresión como para tracción, son las siguientes:

$$d(r) = A_d \frac{r_e}{r} \left( \frac{r-1}{r_p-1} \right)^2 \quad \text{si } r_0 \leq r \leq r_p \tag{27}$$

$$d(r) = 1 - \frac{r_e}{r} \exp \left[ \frac{1}{B_d} \left( \frac{r-r_p}{r_e} \right)^2 \right] \quad \text{si } r_p \leq r \tag{28}$$

Los valores de  $r_e$  y  $r_p$  establecen el tamaño de la superficie envolvente de daño para la primera ocurrencia de éste y el tamaño de las superficies envolventes de daño para la resistencia pico. Estos valores, por simplicidad, se consideran propiedades constantes del material.

Necesariamente  $r_p \geq r_e \geq r_0$  y para el caso límite  $r_p = r_e = r_0 = 1$  el material muestra ablandamiento inmediatamente después de la aparición del daño, situación que normalmente caracteriza el comportamiento a tracción. Las constantes  $A_d$  y  $B_d$  se definen como sigue:

$$A_d = \frac{r_p - r_e}{r_e} \tag{29}$$

$$B_d = \frac{1}{2} \frac{r_p}{r_e} - \frac{1}{l^*} \frac{E G_f}{f^2} + \overline{B_d} \tag{30}$$

donde  $\overline{B_d} = \frac{A_d(r_p^3 - 3r_p + 2/3)}{6 r_e (r_p - 1)^2}$  (31)

siendo  $E$  el módulo de elasticidad, mientras que  $G_f$  es la energía de fractura,  $f$  es la resistencia del hormigón correspondiente y  $l^*$  es la longitud característica del elemento finito, para asegurar resultados independientes del tamaño de malla (Oliver; 1989).

El valor de  $E G_f l f^2$  no depende del grado de envejecimiento  $k$  y por lo tanto se puede expresar para los términos de final de proceso de hidratación  $E_{\infty} G_{f\infty} l f_{\infty}^2$ .

## RESULTADOS

Para estudiar la evolución de las temperaturas y el estado tensional que se genera a partir de éstas en una estructura se analiza el tablero de hormigón del viaducto de acceso al puente de Öresund (Dinamarca) durante su construcción y primeros días de vida. Se evalúa el calentamiento asociado a la liberación de calor por hidratación y su posterior enfriamiento.

Este viaducto denominado Öresund Link es una vía de comunicación de 16 km de longitud que une las ciudades de Copenhage (Dinamarca) y Malmö (Suecia) a través del estrecho de Öresund. Su construcción abarcó los años entre el 1994 y 2000. Para su diseño y construcción se tuvo como premisa que la durabilidad del proyecto debe ser superior a 100 años, para lo cual exige requerimientos estructurales elevados debido a las condiciones ambientales extremas en que se encuentra (temperaturas por debajo de los  $-20^{\circ}\text{C}$ , ambiente marino, procesos hielo-deshielo). En la Figura 3 se puede observar una imagen del puente y en la Figura 4 una sección transversal.



Fig. 3: Imagen del Viaducto de Öresund.

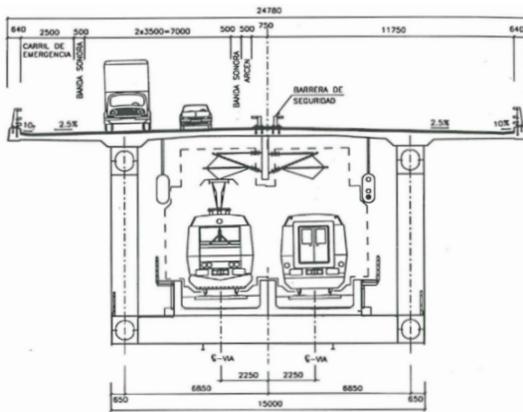


Fig. 4: Sección transversal del viaducto.

El tablero se conforma por una autopista para el tráfico rodado con un total de cuatro carriles de circulación más dos de emergencia, con un total de 23.5 m de ancho y 4.25 m de voladizo. Por debajo del mismo circulan dos vías de ferrocarriles. Su espesor es variable. En la conexión con la estructura metálica es de máximo 0.75m y en el centro es de 0.35m.

El hormigón de la losa de tablero es de alta resistencia, H50, con una resistencia mínima a compresión a 28 días de 50 MPa. La mezcla posee 380 Kg/m<sup>3</sup> de cemento y 38 Kg/m<sup>3</sup> de microsílíce. Las propiedades que caracterizan su comportamiento térmico se consignan en la Tabla I y las de envejecimiento en la Tabla II (Cervera et. al., 1999b).

Estudios muestran que las temperaturas de curado en ensayos a 50°C y 60°C no afectan significativamente la resistencia final a compresión del hormigón. Por ende, para ese rango de temperaturas y un estricto control de calidad, no se tienen efectos perjudiciales en el valor final de resistencia.

Se realizó un ensayo adiabático para determinar el calor liberado sobre 3 probetas. La adición de microsílíce afecta solo la cinética de reacción, retrasando ligeramente el comienzo del proceso. Todos los valores experimentales fueron extraídos de las referencias (Cervera et al, 1999b). En la Figura 5 se observa la

evolución de las temperaturas obtenidas con el modelo utilizando los parámetros térmicos de referencia en comparación con ensayos experimentales.

**I. Propiedades del Hormigón H50 para determinar su curva adiabática**

$w/c$	0.32
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	2340
$C$ [J/m <sup>3</sup> °C]	1870000
$k_T$ [J/m hs °C]	6000
$Q_\xi$ [J/m <sup>3</sup> ]	195000000
$\xi_\infty$	0.64
$f_\infty^-$ [MPa]	54.00

**II. Propiedades para determinar la evolución del envejecimiento de las propiedades mecánicas del hormigón**

$k_\xi/\eta_{\xi_0}$ [10 <sup>7</sup> /hs]	0.27
$\bar{\eta}$	8.40
$A_{\xi_0}/k_\xi$ [10 <sup>-4</sup> ]	1.00
$E_a/R$ [°K]	4000
$\phi_T$ [°C]	100
$\phi_f$ [°C]	20
$n_T$	0.00
$\phi_0$ [°C]	19

La Figura 6 muestra la evolución de la resistencia a compresión en el tiempo para un ensayo isotérmico, comparando los resultados numéricos obtenidos con el modelo propio y los valores obtenidos experimentalmente. La temperatura de ensayo fue de 20°C.

Tanto el ensayo adiabático como el isotérmico, donde se mide la evolución de la temperatura y las propiedades mecánicas respectivamente, permitieron caracterizar el tipo de hormigón de la estructura.

Finalmente se presenta una comparación de los resultados termo-mecánicos medidos en el puente al momento de construcción, los obtenidos por Cervera (Cervera et al., 1999b) y los resultantes del modelo propuesto, simulando las condiciones reales de emplazamiento. Se realiza un análisis bidimensional discretizando el tablero de hormigón en elementos finitos. Por razones de simetría respecto al eje vertical central, solo se modela media sección. La malla tiene 1271 nodos y 2272 elementos triangulares. Para simular la transferencia de calor con el medio ambiente se determinan dos superficies de contacto distintas. En la superior, el hormigón está recubierto por una capa de plástico, y en la inferior se representan las condiciones de encofrado. La variación de la temperatura ambiente se observa en la Figura 7.

Se obtiene de las referencias (Cervera et. Al., 1999b) dos coeficientes de convección-radiación correspondientes a cada superficie, que son función de variables como la humedad ambiente, la velocidad del viento, las horas de insolación, etc. Estos coeficientes se mantienen constantes en todo el tiempo de análisis.

$$h_{superficie superior} = 27000 J/m^2hs^{\circ}C$$

$$h_{superficie inferior} = 12500 J/m^2hs^{\circ}C$$

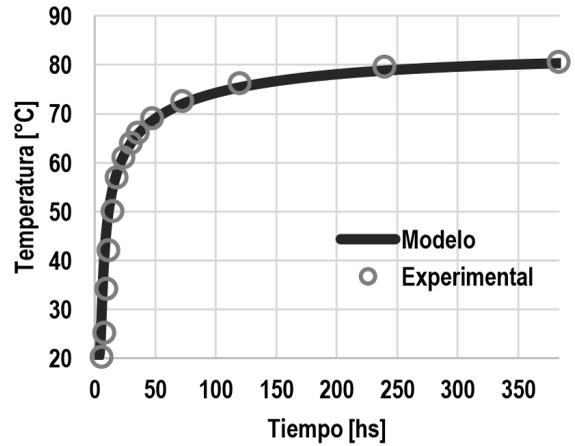


Fig. 5: Evolución de las temperaturas del hormigón H50 en un ensayo adiabático.

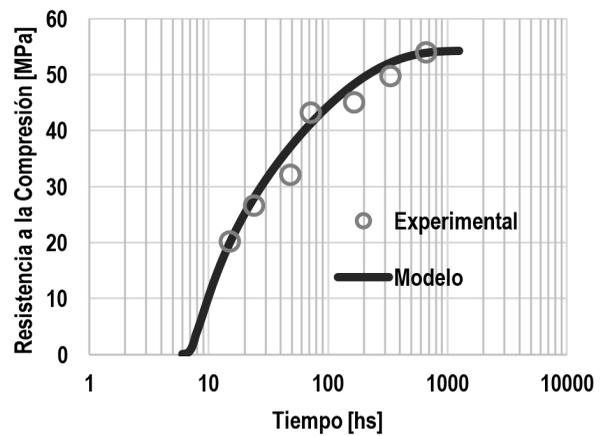


Fig. 6: Evolución de la resistencia a compresión en el tiempo para un ensayo isotérmico.

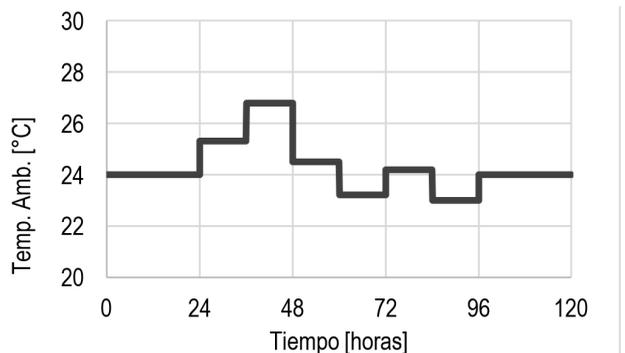


Fig. 7: Variación de la temperatura ambiente en el tiempo de análisis.

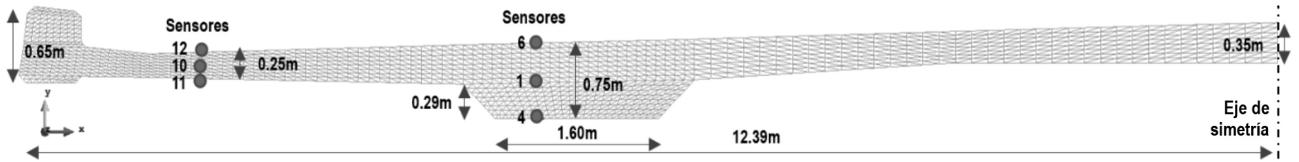


Fig. 8: Malla de elementos finitos y ubicación con numeración de los sensores de temperatura.

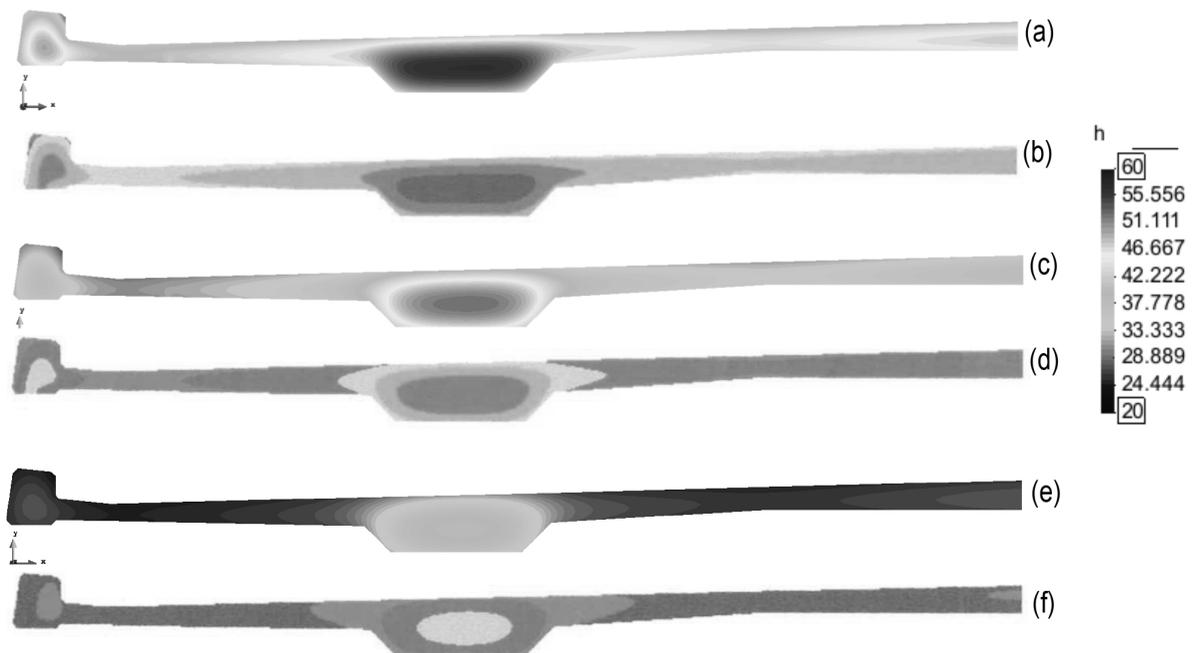
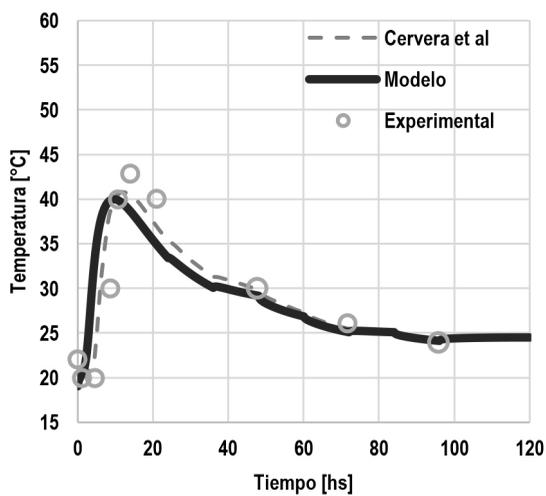
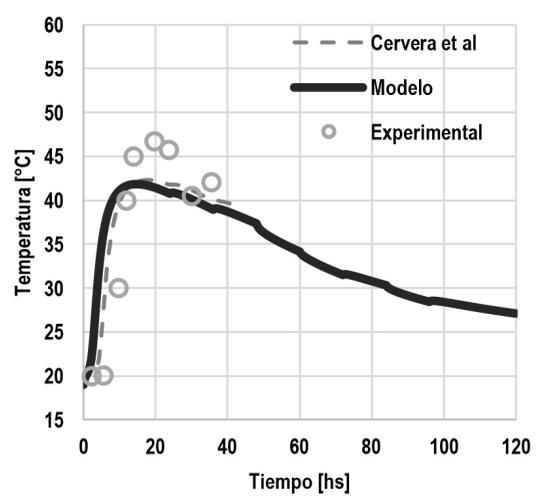


Fig. 9: Mapa de Temperaturas (a) Modelo a 18 hs., (b) Cervera et al. a 18 hs., (c) Modelo a 36 hs., (d) Cervera et al. a 36 hs., (e) Modelo a 72 hs., (f) Cervera et al. a 72 hs.

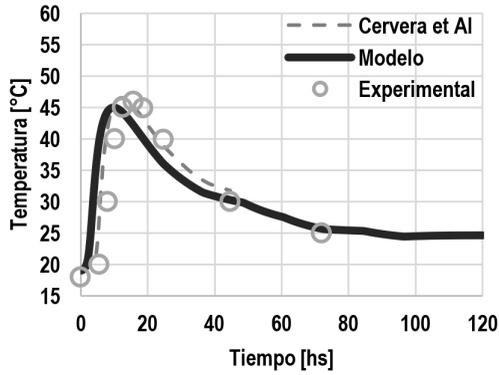


(a)

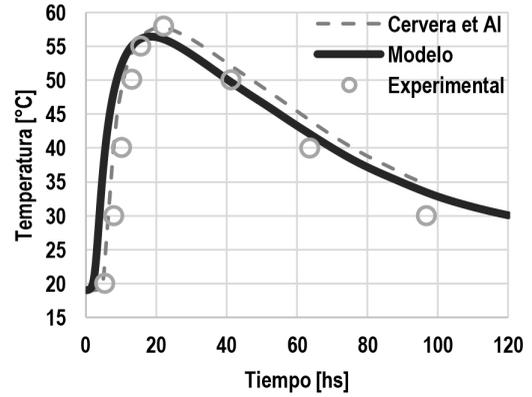


(b)

Fig. 10: Evolución de temperaturas en el tiempo (a) Sensor 12 y (b) Sensor 6.

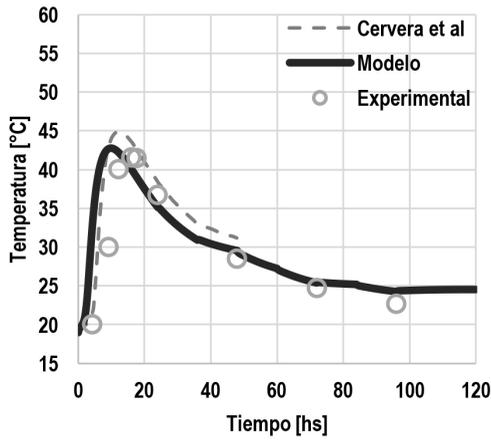


(a)

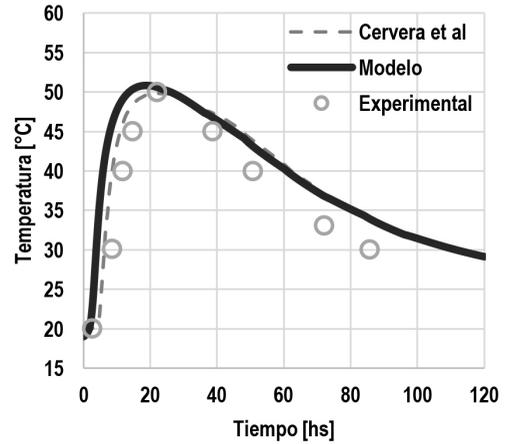


(b)

Fig. 11: Evolución de temperaturas en el tiempo (a) Sensor 10 y (b) Sensor 1.

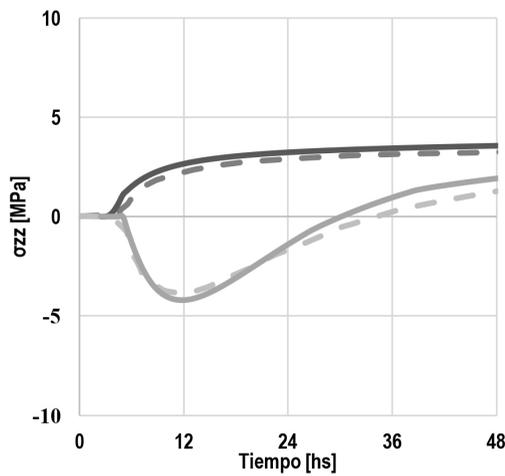


(a)

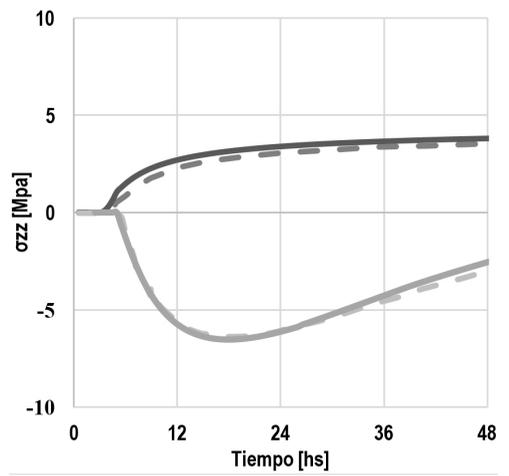


(b)

Fig. 12: Evolución de temperaturas en el tiempo (a) Sensor 11 y (b) Sensor 4.



(a)



(b)

Fig. 13: Tensiones normales en dirección perpendicular al plano en el tiempo para (a) el Sensor 10 y (b) el Sensor 1. La línea de trazos representa los resultados de Cervera et al, mientras que la línea continua muestra los resultados del modelo propuesto.

## CONCLUSIONES

Mediante la utilización del modelo termo-mecánico propuesto es posible resolver problemas de transferencia y generación de calor y de análisis tensional instantáneo en estructuras masivas de hormigón. El mismo funciona como herramienta útil a la hora del diseño y construcción de estructuras hormigonadas por etapas y curadas bajo condiciones específicas.

La metodología de cálculo es capaz de predecir la evolución de la temperatura en la masa de hormigón debido a la hidratación del cemento, considerando las condiciones de emplazamiento que inciden en el problema. Además permite realizar un análisis mecánico acoplado al efecto térmico, obteniendo las tensiones generadas en la estructura.

Los resultados muestran una buena correlación con los obtenidos a partir de ensayos experimen-

tales, los valores medidos in situ en una estructura real y los mostrados en las referencias (Cervera et al., 1999a y 1999b).

Como trabajo a futuro se prevé la implementación de un modelo mecánico diferido que incluya los efectos viscoelásticos propios del hormigón y permita realizar análisis de estructuras a largo plazo. Además, se pretenden estudiar principalmente estructuras hormigonadas por etapas, como por ejemplo el caso de las presas de hormigón compactadas a rodillo.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo recibido a través del proyecto PID UTN 3567 en el que se enmarca este trabajo y a la Dra. Ing. Laura Battaglia por sus grandes aportes.

## REFERENCIAS

Oliver, J., "A consistent characteristic length for smeared cracking models", *Int. J. Num. Meth. Engng.*, 28: 461-474, (1989).

De Schutter, G. and Taerwe, L., "Degree of hydration based description of mechanical properties of early age concrete", *Materials and Structures*, 29: 335-344, (1996).

Cervera, M., Oliver, J. Prato, T., "Un modelo termo-químico-mecánico de hormigón a tempranas edades. Aplicación a la construcción de presas de HRC", *Monografía CIMNE*, 51, 13-48, (1999 a).

Cervera M., Faria R., Oliver J., Prato T., "Análisis Termo-Mecánico del proceso de fabricación de un tablero del viaducto de Öresund", *Publicación CIMNE*,

165, 3-28, (1999 b).

Cervera M., Faria R., Oliver J., Prato T., "Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena", *Computers and Structures*, 80, 1511-1521, (2002).

Coussy O., Ulm F.J., "Strength growth as chemo-plastic hardening in early age concrete", *J. Eng. Mech*, 122, 1123-1132, (1996).

Crespo M.D., "Comportamiento del Hormigón Armado a Tempranas Edades. Efectos Estructurales de las Deformaciones Impuestas Impedidas". *Thesis (Ph.D.)*, Universitat Politècnica de Catalunya, España, (2011).