



*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

## **DETERMINACION DE LA CURVA DE GENERACION DE CALOR PARA EL PROCESO DE FRAGUADO DEL HORMIGON MEDIANTE LA SOLUCION DEL PROBLEMA INVERSO ASOCIADO**

### **HEAT GENERATION CURVE DETERMINATION FOR FRESH CONCRETE THROUGH THE ASSOCIATED INVERSE PROBLEM SOLUTION**

Fulgencio A. Aquino (1)(P); Rubén López (1); Juan Pablo Bellasai (1); Osvaldo Quintana (1); Adolfo Correa (2); Stefan Kirchhofer (1)

(1) Laboratorio de Mecánica Computacional, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay.

(2) Laboratório de Sistemas Computacionais e Sistemas Off-Shore, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

Dirección para correspondencia: aaquino@ing.una.py; (P) Presentador

#### **Resumen**

En este artículo se muestran algunos resultados del algoritmo implementado, para el estudio del comportamiento térmico del hormigón fresco mediante el retro-análisis. Fueron utilizados los resultados experimentales obtenidos anteriormente, con probetas de hormigón confeccionadas en laboratorio, con cementos de la Industria Nacional del Cemento (INC). Con estos datos experimentales, y mediante el algoritmo implementado, se ha obtenido la curva de generación de calor, asociada a las reacciones químicas ocurridas durante el proceso de hidratación del hormigón. Posteriormente, utilizando la curva de generación de calor obtenida para un hormigón del tipo H200-fck=200MPa-CP-II fueron realizadas simulaciones para comparar las temperaturas medidas por un sensor y las obtenidas numéricamente, así como también la distribución de la temperatura en la muestra analizada. Importantes conclusiones fueron obtenidas tanto del proceso de hidratación del hormigón como del comportamiento térmico de la muestra analizada.

*Palabras-clave: Retro-análisis, problemas inversos, hidratación del hormigón, hormigones masivos.*

#### **Abstract**

In this paper is shown some results of the algorithm implemented, to study the thermal behavior of fresh concrete by retro-analysis. Were used the experimental results obtained previously with concrete specimens made in laboratory, by using prototypes of cements from the National Cement Industry (INC). Having this experimental data, and by using the implemented algorithm, has been obtained heat generation curve, associated with the chemical reactions occurring during the hydration process of the concrete. Subsequently, by using the heat generation curve obtained for a concrete type H200-fck=200MPa-CP-II simulations were performed to compare the temperature measured by sensors and the temperature obtained numerically, and the temperature distribution through the sample. Significant conclusions were obtained from both the process of hydration of concrete as the thermal behavior of the analyzed sample.

*Keywords: Retro-analysis, inverse problems, hydration of concrete, mass concrete.*



*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

## 1. INTRODUCCIÓN

El análisis térmico estructural para estructuras de hormigón es muy importante para estructuras de hormigón masa y de alto contenido de cemento. En ese sentido, el problema principal está en la obtención de los parámetros térmicos adecuados para la realización de dicho análisis. En especial, es relevante el análisis térmico en las primeras edades de este tipo de estructura debido a la gran cantidad de calor liberada durante el proceso de hidratación. No obstante, para poder realizar este tipo de análisis es necesario obtener los parámetros térmicos asociados a cada tipo de material. Sin embargo, en general los fabricantes de hormigones no proveen estos datos, probablemente por la complejidad de los fenómenos asociados a las reacciones químicas que ocurren durante el proceso de hidratación. Por este motivo se ha desarrollado un programa experimental en el Laboratorio de Mecánica Computacional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción (LMC-FIUNA) para poder obtener estos parámetros térmicos (López et al. 2012). Estos son obtenidos mediante la introducción de sensores térmicos en el interior de muestras de (Figura 1), una vez obtenidos los valores de temperaturas para diferentes tiempos se obtienen mediante una técnica de optimización los valores de los parámetros térmicos (Quintana, 2013). Las ventajas principales de esta técnica es que los ensayos pueden realizarse con relativa facilidad y los parámetros obtenidos son parámetros macromecánicos usuales. Para la solución de los problemas directo e inverso asociados al problema térmico han sido desarrollados diferentes algoritmos implícitos y explícitos (Kirchhofer, 2013; Correa, 2014). El algoritmo explícito tiene la ventaja de ser relativamente simple, no obstante, es condicionalmente estable y depende de las características de los sensores y de las geometrías de las probetas. El algoritmo puramente implícito sin embargo es incondicionalmente estable, pero requiere de una gran capacidad de procesamiento computacional (Wang & Chen, 2003). Alternativamente el Método de Dirección Implícita Alternativa (ADI) es incondicionalmente estable y al mismo tiempo requiere una capacidad de procesamiento mucho menor que un algoritmo implícito puro.

La reacción exotérmica que ocurre en el proceso de hidratación y las propiedades térmicas del hormigón no genera dificultades en el vaciado de hormigones en cantidades moderadas, pues la mayor parte del calor de hidratación generado en su masa se disipa rápidamente, por lo que no se generan diferenciales significativas entre la temperatura interior y la exterior. No obstante, en grandes volúmenes, el calor generado por el calor de hidratación se disipa muy lentamente, lo que genera elevadas temperaturas en la masa de concreto y en muchos casos se originan fisuras de origen térmico en el interior de la estructura.

Existen otras publicaciones que modelan el comportamiento térmico del hormigón. Maekawa et al. (Maekawa et al., 2003) propone un modelo multi-escala complejo para explicar el proceso de hidratación y la propagación de fisuras, James and Dollar (James and Dollar, 2003) realizaron un estudio de una presa utilizando el programa Abaqus para las simulaciones, Coelho et al. (Coelho et al., 2014) realizaron una simulación de una presa utilizando el programa Ansys, en todos estos casos fueron obtenidos resultados importantes para la descripción del comportamiento térmico del hormigón. Además de los trabajos citados existen muchos otros trabajos que muestran la importancia y actualidad del problema abordado en este artículo.

### 1.1. Obtención de las temperaturas internas del hormigón durante el fraguado

Fueron utilizados termopares colocados dentro de muestras cúbicas de hormigón de 75 centímetros de lado, estos sensores fueron colocados en ocho puntos interiores a estas muestras (Figura 1). Las lecturas de las temperaturas internas fueron realizadas durante 28 días con una frecuencia de 1 hora. Fueron analizadas muestras de hormigón con diferentes resistencias, los resultados presentados en este artículo corresponden a un hormigón del tipo H200 Compuesto ( $f_{ck}=200\text{kg/cm}^2$ ).

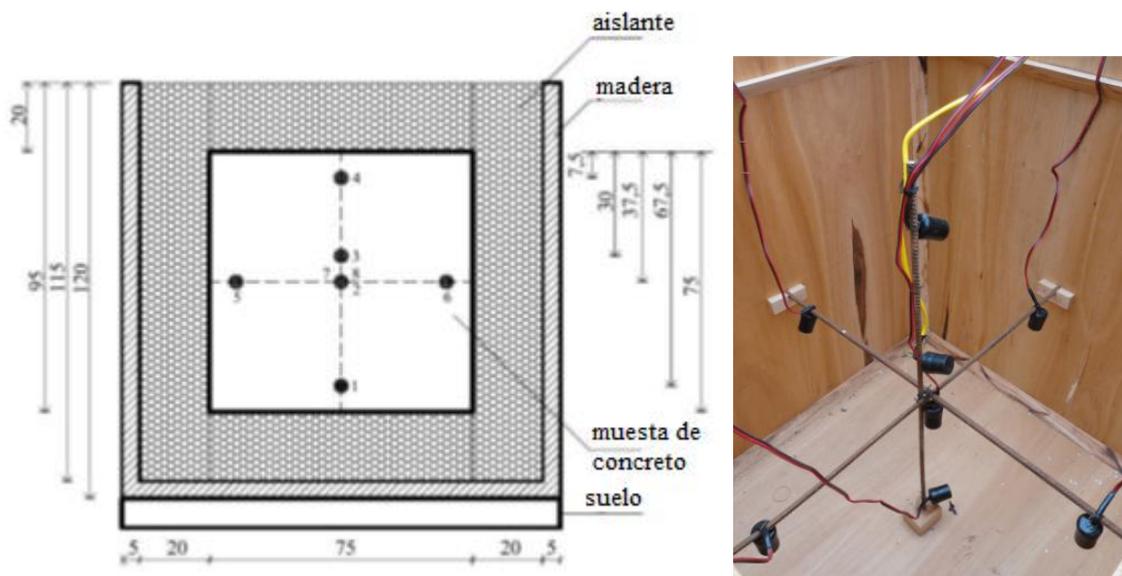


Figura 1. Ubicación de los termopares y aislamiento de las muestras.

### 1.2. Algoritmo de estimación de la curva de generación de calor durante el fraguado

Para la obtención de la curva de generación de calor durante el fraguado fue utilizado un algoritmo que obtiene esta curva mediante el retro-análisis. El retro-análisis consta esencialmente de dos partes: solución del problema directo y solución del problema inverso asociado. En este algoritmo el problema directo es resuelto mediante el Método de Diferencias Finitas, en cambio el problema inverso asociado mediante el Método de los Gradientes Conjugados. El algoritmo presentado utiliza el Método ADI para la solución del problema directo.

#### 1.2.1. Problema directo

La temperatura durante el proceso de hidratación del hormigón es usualmente determinada mediante la ecuación de calor (Özsisik, 1985):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \dot{q} \quad (1)$$

Donde

k = conductividad térmica para un medio isotrópico y homogéneo.

$\rho$  = densidad del hormigón.

$c$  = calor específico del hormigón.

$\dot{q}$  = fuente de generación de calor interno.

La ecuación (1) tiene una solución única adoptando las condiciones iniciales y de contorno adecuadas.

La temperatura inicial en el interior de la muestra es dada por:

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \text{ en } \Omega \quad (2)$$

El flujo de calor en el contorno de la muestra está dado por:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \bar{q} \text{ en } \partial\Omega \quad (3)$$

Siendo  $n$  la normal a la superficie de la muestra.

Utilizando la ley de enfriamiento de Newton se obtiene:

$$\bar{q} = h(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

Donde

$h$  = coeficiente de convección.

$T_s$  = temperatura en la superficie de la muestra.

$T_\infty$  = temperatura fuera de la muestra.

$\bar{q}$  = flujo de calor por convección.

Para solución de la ecuación (1) con las condiciones iniciales y de contorno fue utilizado el Método de Douglas-Gunn que es incondicionalmente estable. Además, este método numérico es eficiente computacionalmente comparado con un método implícito puro.

### 1.2.2. Función objetivo y curva de generación de calor

La función objetivo se obtiene mediante la suma de los cuadrados de las diferencias entre las temperaturas medidas, en uno o varios sensores, en el tiempo y las calculadas

$$S(\mathbf{P}) = [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{P})]^T [\mathbf{Y} - \mathbf{T}(\mathbf{P})] \quad (5)$$

Donde

$\mathbf{P}^T = [P_1, P_2, \dots, P_N]$  = Vector de los parámetros térmicos desconocidos.

$Y_i = Y(t_i)$  = Temperatura medida en el tiempo  $t_i$  por los sensores.

$T_i(\mathbf{P}) = T(\mathbf{P}, t_i)$  = Temperatura obtenida numéricamente en el tiempo  $t_i$ .

En el caso de que los parámetros desconocidos estén todos asociados a la curva de generación de calor, utilizando una función polinomial de orden N-1 se tiene:

$$g(t) = P_1 + P_2 t + \dots + P_N t^{N-1} \quad (6)$$

### 1.2.3. Algoritmo de solución del problema inverso

Para la solución del problema inverso fue utilizado el algoritmo descrito en la Figura 2. La solución del problema inverso fue realizada utilizando el Método del Gradiente Conjugado.

El algoritmo de solución del problema inverso es esencialmente sensible a los valores iniciales de los parámetros a estimar, a la ubicación de los sensores en el dominio considerado y al número de sensores utilizados. Para realizar este estudio de sensibilidad fue realizado un gran número de simulaciones. Además, teniendo en cuenta que combinaciones con valores diferentes de los parámetros pueden arrojar valores de salidas muy semejantes, existe un problema en la

unicidad de soluciones, motivo por el cual es necesario realizar constantemente consideraciones físicas y numéricas para asegurar que los valores obtenidos sean adecuados. Esto implica la necesidad de tener un dominio considerable sobre los fenómenos asociados al proceso térmico descrito por el modelo y adicionalmente tener un conocimiento adecuado de las técnicas numéricas utilizadas.

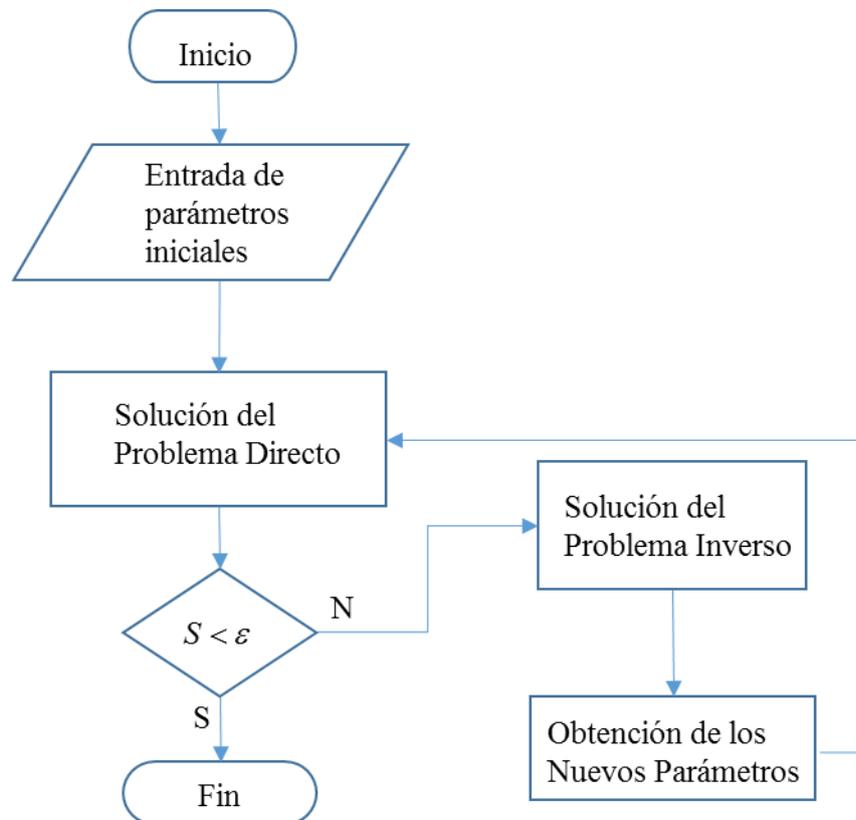


Figura 2. Algoritmo para la solución del problema inverso.

## 2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para obtener la curva de generación de calor fueron utilizadas las constantes térmicas de la Tabla 1. Para las condiciones de frontera fueron consideradas las propiedades térmicas del recubrimiento de madera y del material aislante dispuestas tal como se muestra en la Figura 1. Luego de obtener la curva de generación de calor fueron realizadas simulaciones numéricas utilizando el método de los elementos finitos para obtener las temperaturas en los puntos donde se localizaron los sensores. Una vez obtenidas las temperaturas en esos puntos fueron comparados sus valores con los obtenidos experimentalmente. Finalmente se muestran la distribución de temperaturas en la muestra analizada mostrando la variación del campo térmico en el tiempo.

Tabla 1. Constantes térmicas para el hormigón H200 Compuesto

Calor específico (J/kg °C)	825
Conductividad térmica (W/mm °C)	1,12e-3

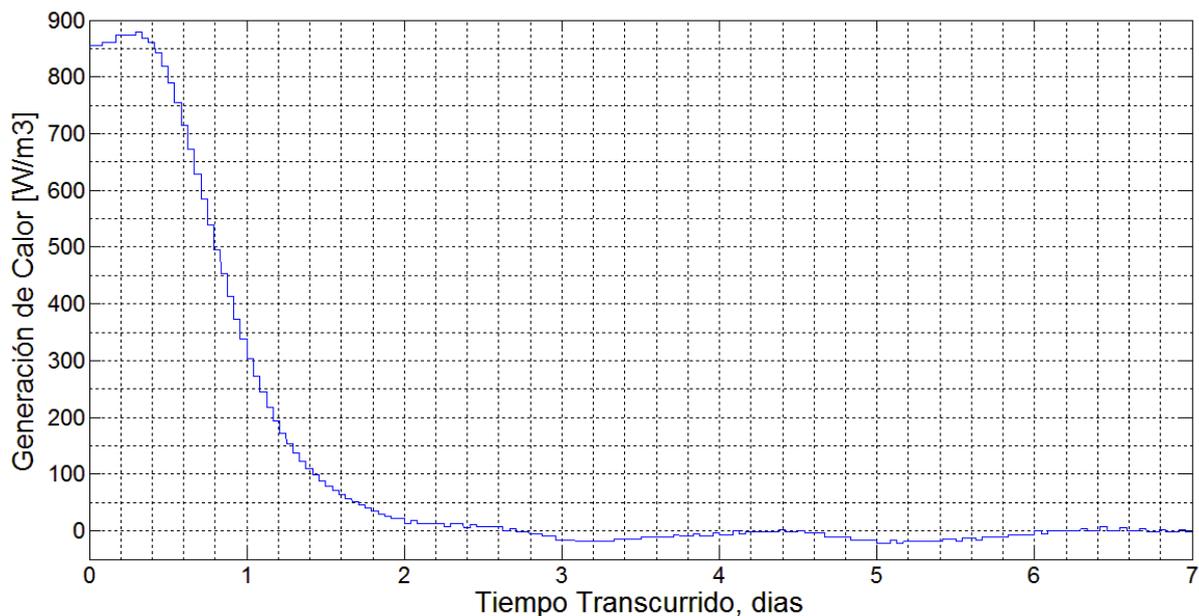


Figura 3. Curva de generación de calor.

La curva de generación de calor, que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, alcanza su valor máximo cuando transcurren, aproximadamente, ocho horas desde el inicio del fraguado. Además, se puede observar que las reacciones químicas son mínimas a partir del segundo día de fraguado.

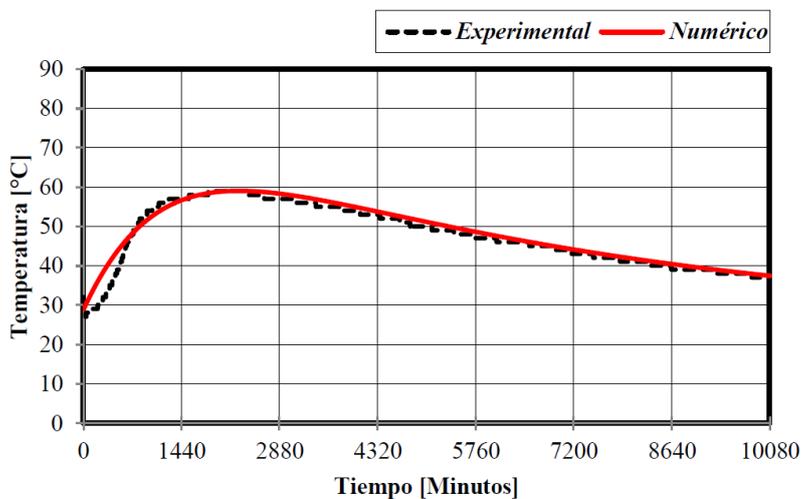


Figura 4. Comparación entre las temperaturas calculadas y obtenidas por un sensor.

La Figura 4 muestra que los valores obtenidos numéricamente son muy aproximados a los obtenidos en forma experimental por el sensor analizado (sensor ubicado en el centro de la



*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

muestra). También fueron comparados los resultados numéricos con los otros sensores colocados dentro de las muestras, en todos los casos los resultados numéricos y experimentales fueron tuvieron una muy buena aproximación, esto demuestra que la curva de generación de calor obtenida es adecuada para este material.

La Figura 5 muestra la distribución de la temperatura en forma transiente. La temperatura inicial de la muestra es de 27 °C. Después de una hora la temperatura máxima alcanzó los 30 °C. Posteriormente, después de 6 horas del inicio del fraguado la temperatura en el centro tiene un valor aproximado a los 40 °C. Habiendo transcurrido 12 horas las temperaturas máximas fueron de unos 47 °C. Una vez transcurrido 24 horas se observan temperaturas aún mayores de unos 55 °C. Al cabo de 3 días, sin embargo, la temperatura máxima disminuye a unos 48 °C. Finalmente, a los 7 días se observan temperaturas máximas de unos 31 °C.

La descripción del campo térmico es coincidente con la curva de generación de calor, observándose una inercia térmica debido a la baja conductividad térmica del hormigón, dificultando el enfriamiento de la muestra. Para estructuras más masivas el enfriamiento aún es más lento. Estos resultados muestran la importancia de tener en cuenta el problema térmico en una estructura de hormigón. Una de las consecuencias posibles de este trabajo es la de controlar la temperatura de la mezcla antes de la evacuación de la misma. Se puede utilizar también con más confianza nuevos tipos de materiales y aditivos haciendo un análisis previo mediante la utilización de esta técnica numérica-experimental propuesta. En efecto, las nuevas técnicas de la construcción civil obligan a utilizar nuevos materiales cuyos comportamientos no se conocen adecuadamente aún.

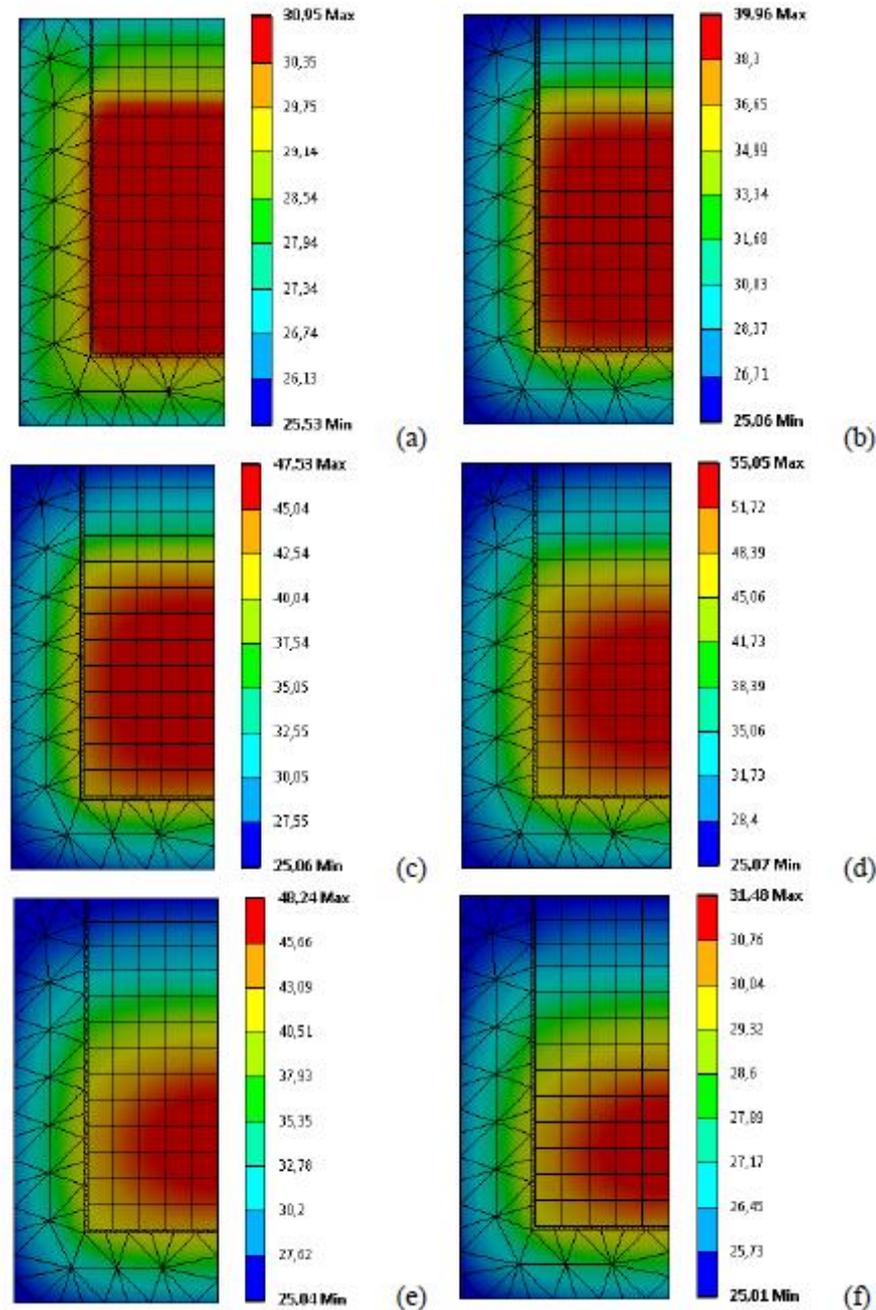


Figura 5. Distribución de la temperatura estimada numéricamente utilizando la curva de generación de calor. (a) 1 hora. (b) 6 horas. (c) 12 horas. (d) 24 horas. (e) 3 días. (f) 7 días.

### 3. CONCLUSIONES

En este artículo fue descrito un método numérico aplicado para la predicción de la temperatura en el interior de una muestra de hormigón. Esta predicción se realiza durante el proceso de fraguado del mismo. El algoritmo para la solución del problema inverso fue



*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

implementado en el programa Matlab. Una vez que se obtiene la curva de generación de calor es posible realizar simulaciones numéricas mediante la solución del problema directo asociado. Esta metodología se mostró eficiente para la predicción del campo térmico durante el proceso de hidratación del hormigón. Si bien solo fueron presentados resultados para el hormigón H200 fueron analizados también otros tipos de hormigones mostrando una buena aproximación entre las temperaturas medidas por los sensores y los estimados numéricamente. El programa experimental descrito en este artículo, donde la muestra está bajo condiciones de contorno semi-adiabático, se mostró eficiente, aunque utilizando condiciones más controladas puede mejorar la precisión de los experimentos. Mediante la utilización de la metodología propuesta es posible analizar diferentes escenarios tales como la influencia de la temperatura inicial de la muestra en el comportamiento térmico de una estructura de hormigón maciza, la influencia de aditivos, del tipo de cemento etc., en el comportamiento térmico de la estructura en sus primeras edades. Finalmente, la utilización de esta metodología puede ayudar a mejorar la seguridad de las estructuras, mediante un análisis criterioso del comportamiento térmico de las mismas, lo que muchas veces no es tenida en cuenta en un proyecto estructural debido especialmente a la falta de datos adecuados para realizar dicho análisis.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del Paraguay por el apoyo financiero recibido para la ejecución del Proyecto de Investigación Institucional 14-INV-268 que permitió la presentación de los resultados obtenidos y que son publicados en el presente trabajo.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Coelho N. et al. Use of ANSYS for Thermal Analysis in Mass Concrete. Journal of Civil Engineering and Architecture, July 2014, Volume 8, No. 7 (Serial No. 80), pp. 860-868.

Correa, A. (2014). Implementación de un Algoritmo Implícito para la Obtención de los Parámetros Térmicos del Proceso de Fraguado del Hormigón Mediante la Solución del Problema Inverso Asociado. Trabajo Final de Grado en Ingeniería Civil, FIUNA, Asunción, Paraguay.

James R. and Dollar D. Thermal Engineering for the Construction of Large Concrete Arch Dams. The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, March 16-20, 2003.

Kirchhofer, S. (2013). Análisis Térmico de un Sólido Reactivo Mediante el Retro-Análisis. Trabajo Final de Grado en Ingeniería Electro-Mecánica, FIUNA, Asunción, Paraguay.

Lopez, R., Aquino, F., Quintana, O.D., Benitez, J., Benitez, M., Martinez, D. (2012). Study of Thermal Concrete Performance at Early Age in Hot Climate, Anais do 54° Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, Maceió, 2012.

Maekawa K. , Ishida T. and Kish T.. Multi-scale Modeling of Concrete Performance Integrated Material and Structural Mechanics. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1, No. 2, 91-126, July 2003.



*La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad*

Özisik, M.N. (1985). Heat Transfer, a Basic Approach, McGraw-Hill Book Co., Singapore.

Quintana, O. (2013). Determinación de las Propiedades Térmicas del Hormigón Durante el Proceso de Hidratación Mediante la Solución del Problema Inverso. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, FIUNA, Asunción, Paraguay.

Wang, T. and Chen, C. (2003). Thermal-ADI—A Linear-Time Chip-Level Dynamic Thermal-Simulation Algorithm Based on Alternating-Direction-Implicit (ADI) Method. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 11, No. 4, August 2003, p. 691-700.