

MODELO PARAMÉTRICO PARA ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA MÁXIMA BASADO EN ECUACIONES DE FOURIER

Romina González¹, Eduardo Acosta¹, Luis Fernández Luco¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN

La temperatura máxima que alcanza el hormigón a edad temprana podría derivar en la formación de etringita diferida (DEF). Este trabajo aborda el desarrollo de una herramienta basada en las ecuaciones de Fourier, para estimar la temperatura máxima que se alcanzará en un volumen dado de hormigón y el perfil térmico correspondiente. Los datos de entrada son el calor de hidratación del cemento, la evolución esperada en el tiempo del calor generado, el contenido unitario de cemento, la temperatura ambiente y la temperatura de colocación. Esta herramienta fue validada contra una suite comercial basada en elementos finitos y con los resultados experimentales de la instrumentación de una viga. Los resultados muestran que la temperatura máxima puede estimarse con un error menor del 5 % con respecto a los datos medidos y es comparable a la herramienta comercial; por su carácter paramétrico, puede emplearse para la enseñanza.

Palabras claves: hormigón, modelo paramétrico, temperatura máxima, etringita diferida, Fourier.

INTRODUCCIÓN

La evolución de la temperatura del hormigón a edades tempranas determina muchas de las características de resistencia y durabilidad que el material presentará durante su ciclo de vida [1]. Por ejemplo, si la temperatura del hormigón supera aproximadamente 70 °C a edad temprana, el hormigón podría quedar expuesto al deterioro causado por DEF (formación de etringita diferida), un fenómeno expansivo que genera fisuras por ataque interno de sulfatos [2, 3].

Aunque existen programas de software en el Mercado que permiten efectuar análisis térmicos del hormigón estructural con resultados confiables, éstos presentan algunas desventajas, entre las que pueden citarse el costo de las licencias, la necesidad de experiencia en el manejo del software para asegurar la confiabilidad de los resultados y que operan como una caja negra.

Esto conduce a que muchas veces se omita realizar un análisis térmico preliminar, lo que podría traer consecuencias severas para el material en la etapa de uso, con costos importantes de reparación, o incluso con la salida de servicio del elemento o estructura afectados.

Formación de Etringita Diferida (DEF)

El sulfato de calcio (yeso mineral) se agrega al clinker de cemento pórtland como agente regulador de fraguado. En situaciones habituales, no ocurren reacciones deletéreas y el tiempo de fraguado se desarrolla según lo previsto, pero cuando la temperatura del hormigón a edad temprana excede los 65-70 °C [2-5], hay riesgo de un ataque por sulfatos internos para el hormigón endurecido maduro.

La teoría más aceptada es que una vez que se supera cierta temperatura crítica, los sulfatos se insertan en la estructura del gel de silicato de calcio hidratado (SCH). A edades tardías, se libera los iones sulfato al medio, generando acciones potencialmente deletéreas sobre el hormigón, con fisuraciones. La Figura 1 [3], que representa una micrografía de hormigón deteriorado por DEF, muestra las estructuras aciculares típicas, identificadas como A.

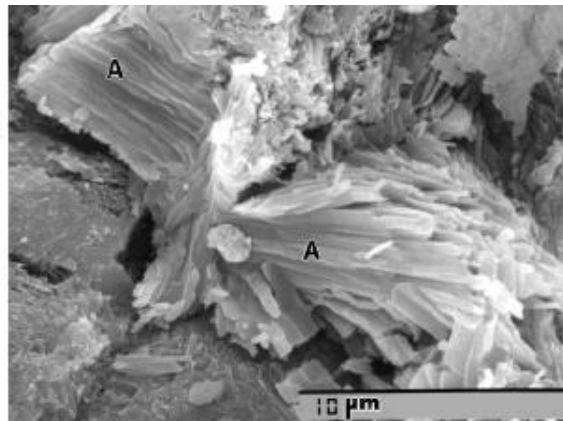


Figura 1: imagen SEM de la zona interfacial afectada por DEF [3].

OBJETIVO

Este trabajo tiene por objetivo el desarrollo de una herramienta paramétrica, basada en las leyes de transferencia de calor adaptadas al hormigón, que permite una estimación de la evolución de temperatura a edad temprana en función de parámetros de diseño de la mezcla, propiedades de los materiales, la geometría, la temperatura de colocación y la temperatura externa.

METODOLOGÍA

La metodología empleada para alcanzar el objetivo, se divide en dos etapas principales:

- a) El desarrollo de la herramienta para el cálculo de temperaturas basada en la ley de Fourier
- b) Validación de la herramienta por análisis comparativo con un programa pago ad-hoc y con los resultados de la instrumentación de un elemento de hormigón a escala real, con geometría no esférica.

La etapa a) se subdividió como sigue:

- Obtención de la expresión de la Ley de Fourier en coordenadas esféricas, que resulta de máxima aplicabilidad para la estimación de temperatura máxima en hormigón masivo [6-8].
- Resolución de la ecuación diferencial para diferentes condiciones de borde [9].
- Definición de los parámetros con influencia significativa para la distribución de temperatura y la temperatura máxima estimada.

- Desarrollo de una planilla de cálculo para la resolución efectiva de las ecuaciones desarrolladas.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

¿Por qué coordenadas esféricas / modelo teórico esférico?

Se decidió resolver la ecuación de Fourier para una esfera, en coordenadas esféricas, por diversas razones; desde lo operativo, simplifica la resolución de las ecuaciones diferenciales, mientras que físicamente, es el volumen que maximiza la relación volumen/superficie, lo que nos ubica del lado de la seguridad.

Cuando la situación real conduce al análisis de geometrías diferentes de la esférica, la adecuación puede llevarse a cabo de diferentes maneras, como por ejemplo aproximando a la esfera inscrita o a una esfera de igual relación superficie/volumen que el volumen en análisis.

Modelización de la generación de calor por parte del cemento

Considerando que la hidratación del cemento muestra un periodo de aceleración y otro de desaceleración, se adoptó una línea quebrada (o una aproximación bilineal) por medio de dos funciones lineales del tipo $f(x) = ax + b$. El enfoque adoptado se muestra en la Figura 2.

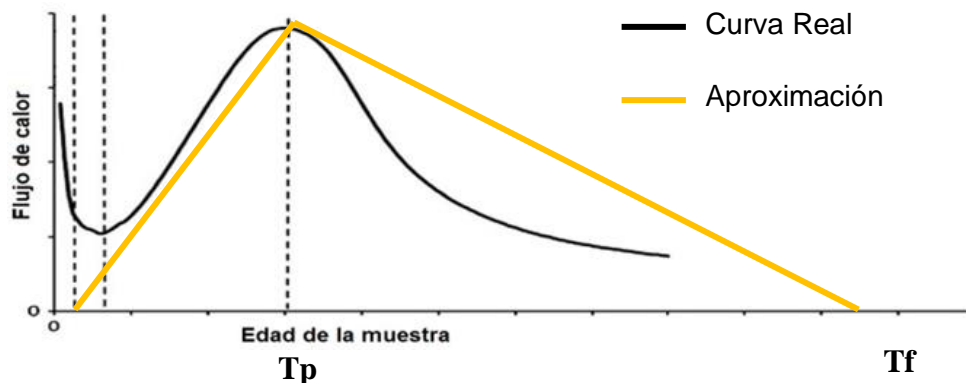


Figura 2: Evolución de calor vs tiempo (experimental / adoptado) [10].

La función aproximada adoptada debe verificar que su integral (área bajo la curva) sea equivalente al total de calor generado por el cemento en el tiempo por unidad de volumen de hormigón. Este valor se obtiene multiplicando el contenido unitario de cemento (CUC) por el calor de hidratación por kg de cemento (Q).

Para determinar los parámetros de esas funciones, se establecen el tiempo de ocurrencia del pico de calor (T_p) y el período para el cual se supone que cesa (o es despreciable) la generación de calor (T_f). Para este trabajo, se adoptó 12 horas para T_p y 7 días para T_f . Cuando se emplee cementos con una evolución sensiblemente más lenta, deben ajustarse estos valores.

Condiciones de borde

Adoptamos una esfera con $0 \leq r \leq R$, inicialmente a T_0 . Para $t > 0$, la superficie externa esférica $r=R$ se mantiene a una temperatura constante T_1 , mientras que, internamente, el calor se genera con a una cierta velocidad, según la función bilineal adoptada como función del tiempo (W/m^3).

Resolución de la ecuación diferencial en función de las condiciones de borde

La ecuación diferencial que representa los fenómenos de transporte de calor, en este caso donde la pérdida por radiación es despreciable y no hay fenómenos de convección, puede escribirse como sigue:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial t} T(r,t) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} T(r,t) \right) + \frac{1}{\lambda} q(r,t) \quad (1)$$

Donde las condiciones de borde son las siguientes:

$$T(r,0) = T_0 \quad \text{para } 0 \leq r \leq R \quad (2)$$

$$T(R,t) = T_1 \quad \text{para } t > 0 \quad (3)$$

Para obtener resultados numéricos, es necesario asignar valores numéricos a los parámetros seleccionados para el modelo, es decir, cuantificar los parámetros de entrada.

Parámetros de entrada

Los parámetros de entrada para la obtención de resultados numéricos son los siguientes:

- Calor de hidratación del cemento
- Contenido unitario de cemento (CUC)
- Coeficiente de conductividad térmica λ (Obtenido experimentalmente o según ACI 122R-02)[3]
- Difusividad térmica (para condiciones no estacionarias) según:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d \cdot c_s} \quad (4)$$

Con $c_s = 960 \text{ J/kg } ^\circ\text{K}$ y d: dimensión transversal crítica

- Temperatura de colocación del hormigón y temperatura externa (aire)

Adaptación de la solución esférica a geometrías diferentes de la esférica

Los parámetros geométricos dependen de la forma y dimensiones del objeto en consideración. Para el modelo geométrico, el parámetro representativo es el radio y es suficiente considerar aquel que conduzca a condiciones adiabáticas.

Otra alternativa es determinar el radio de la esfera tal que la relación superficie/volumen sea equivalente a la del elemento en estudio. Este criterio se adopta para la validación del método empleando mediciones reales en una viga de hormigón.

Con estos datos, se ingresa a la hoja de cálculo para resolver diferentes cuestiones o desarrollar un análisis de sensibilidad de variables vinculadas con la temperatura máxima (por ejemplo, identificar cuál medida será más eficaz para la reducción de la temperatura máxima).

Consideraciones específicas para hormigón a edad temprana

El hormigón no puede considerarse como un material homogéneo en la micro o meso escala, pero es razonable asumirlo para consideraciones macroscópicas, donde sus dimensiones superen la dimensión crítica, usualmente 3 veces el TM de agregado. Para situaciones asociadas con riesgo de temperatura superior a la crítica para la formación de etringita diferida, esto se cumple siempre.

Por simplicidad y tratándose de un método aproximado, de primera fase, se prescinde de las proporciones del hormigón y se ignoran fenómenos acoplados entre la transmisión de calor y de humedad. De hecho, para los tiempos involucrados en alcanzar la temperatura máxima, la pérdida de humedad, sobre todo en elementos de baja relación superficie/volumen es muy limitada.

Como es bajo el movimiento de agua interna, pueden despreciarse los mecanismos convectivos y la pérdida por radiación puede despreciarse también. En consecuencia, toda la transmisión de calor a edad temprana se limita a conducción térmica.

El calor generado se asocia a la hidratación del cemento pórtland; el tipo y contenido de cemento condicionan el calor total generado y la cinética de la reacción. Las diferentes situaciones pueden aproximarse con el modelo bilineal propuesto.

VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA DESARROLLADA

La validación de la herramienta desarrollada se realizó por comparación con la temperatura máxima estimada mediante un software comercial y con los resultados de la medida de la temperatura en un elemento viga de grandes dimensiones, instrumentada con termopares.

Parámetros del modelo

El elemento estructural es una viga de grandes dimensiones y una sección transversal irregular, como se esquematiza en la Figura 3. El uso de encofrados metálicos no proveyó de aislamiento térmico.

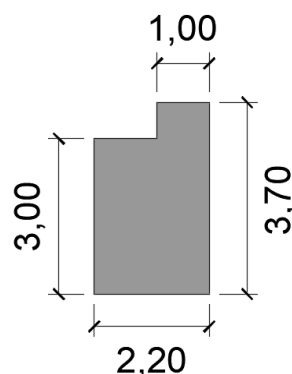


Figure 3: Sección transversal de la viga instrumentada con termocuplas.

Para aproximar a esa sección, se adoptó el radio de la esfera con una relación superficie / volumen equivalente al de esta viga. Las proporciones del hormigón se muestran en Tabla 1.

Tabla 1: Proporciones y constituyentes del hormigón.

Constituyente	(kg/m ³)
Agua	161
CPN 50	135
EGAH molida	315
Arena fina	645
Arena 0-6	270
Piedra partida 6-12	605
Piedra partida 12-20	265
Superfluidificante	3,15

El calor de hidratación del cemento de escoria se asumió como un 45 % del que corresponde al CPN, mientras que el pico de generación de temperatura se ubicó a las 36 horas del colado. La temperatura ambiente (valor medio) se tomó de datos climáticos [12] y la temperatura de colocación (20 °C) corresponde a los registros de la obra.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU VALIDACIÓN

La Tabla 2 ilustra los resultados obtenidos para la viga instrumentada, el modelo esférico propuesto y el software comercial. Debe indicarse que la predicción para el software comercial se hizo para una temperatura de colocación de 25 °C; una estimación para la temperatura real de colocación conduciría a resultados comparables a los del modelo esférico.

Tabla 2: resultados comparados indicando sesgo absoluto y porcentual.

	Tmax (°C)	Sesgo (°C)	Sesgo (%)
Temperatura medida	65,70	-	-
Modelo esférico	62,87	2,83	4,31
Software comercial	74,00	8,30	12,63

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo esférico desarrollado es adecuado para una evaluación preliminar del riesgo de alcanzar temperaturas críticas para el fenómeno de ataque interno por sulfatos (DEF) en hormigón a edad temprana.

Su comportamiento óptimo ocurre para grandes dimensiones que conducen a condiciones adiabáticas y donde el efecto de borde es depreciable.

El modelo puede adaptarse a resolver otros problemas diferentes del caso del hormigón masivo, sobre todo en estructuras que, en apariencia, no constituyen casos problemáticos pero en las que las proporciones de la mezcla, el contenido y tipo de cemento y las condiciones de ejecución podrían derivar en casos críticos.

REFERENCIAS

- [1] Ese material llamado Hormigón, Ed. AATH, (2012), ISBN 978-987-21660-5-2.
- [2] Day RL, "The effect of secondary ettringite formation on the durability of concrete: A literature analysis, (1992).
- [3] Sarkar, Shondeep, y otros, "Evaluation of runway distress and repair strategy at Hoby Airport. s.l.", Concrete repair bulletin, (2001).
- [4] Tapia Parada F, "Vulnerabilidad de los hormigones masivos frente al fenómeno expansivo por formación de etringita tardía en función del contenido de puzolana en cementos nacionales", Tesis de grado, Universidad de Chile, (2015), 110p.
- [5] Godart B, Divet L, "Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and the French prevention strategy", Fifth International Conference on Forensic Engineering, Institution of Civil Engineers, (2014), France. 12p, hal-00945667f.
- [6] Necati Özisik M, "Heat Conduction2, Wiley Interscience, (1993).
- [7] ACI 122R-02, "Guide to Thermal Properties of Concrete and Masonry Systems", American Concrete Institute, (2002).
- [8] ACI 207.1R-96, "Mass Concrete", American Concrete Institute, (1996).
- [9] Polyanin A, Zaitsev V, "Handbook of nonlinear partial differential equations", Chapman & Hall, (2004).
- [10] Priji ME, "Hydration of cement and its mechanisms", IORS Journal of Mechanical and Civil Engineering, (2016).
- [11] Batic OR, Sota JD, Falcone DD, "Influencia de la incorporación de escoria en las características de los cementos resultantes", PROCQMA, Universidad Tecnológica Nacional, (2006).
- [12] https://www.meteored.com.ar/tiempo-en_Buenos+Aires-America+Sur-Argentina-Ciudad+Autonoma+de+Buenos+Aires-SABE-sactual-13584.html.

