

ANÁLISIS DE LA APARICIÓN DE FISURAS DE ORIGEN TÉRMICO EN ESTRUCTURAS MASIVAS DE HORMIGÓN UTILIZANDO UN MODELO DE FISURACIÓN COHESIVA CON ACOPLAMIENTO TERMO-MECÁNICO

M.P. Zappitelli^{1*}, E.I. Villa¹, J. Fernández-Sáez², C.G. Rocco¹

¹ Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.
*paula.zappitelli@ing.unlp.edu.ar

² Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid.
Av. de la Universidad 30. 29811 Leganés, Madrid, España.

RESUMEN

Las estructuras de hormigón masivo, como las presas o grandes bases de fundación, se encuentran sometidas a importantes cambios volumétricos debidos al calor liberado por la hidratación del cemento. Estos cambios originan tensiones de tracción que pueden dar lugar a la aparición de fisuras y afectar el comportamiento en servicio de la estructura. En este trabajo se presentan los resultados correspondientes al estudio de la localización y evolución de fisuras de origen térmico en una base de fundación. Las propiedades del material han sido asignadas aleatoriamente utilizando un código desarrollado en MATLAB. Se aplicó un modelo XFEM basado en el método de los segmentos cohesivos, disponible en el código de análisis por el Método de los Elementos Finitos ABAQUS V6.14. Los resultados obtenidos arrojaron patrones de fisuración que se corresponden, tanto en su localización como en su evolución temporal, con los observados en la práctica en este tipo de estructuras.

PALABRAS CLAVE: Estructuras de hormigón masivo, análisis termo-mecánico, XFEM, fisuras de origen térmico, modelo de fisuración cohesiva.

ABSTRACT

Concrete massive structures, such as large dams and foundations, present volumetric changes because of the heat realised during the cement hydration process. This changes cause tensile stresses, which can generate cracks that could impact in the structure service behaviour. This paper presents the results of a thermal crack localization and evolution study of a foundation considering variable geometry and different boundary conditions. Material properties have been assigned in an aleatory way employing a MATLAB code developed by the authors. An XFEM model based in the cohesive segment method, available in the Finite Element Method Code ABAQUS V6.14, was implemented. The results show cracking patterns that match with the localization and temporal evolution of the patterns observed in the practice.

KEYWORDS: Massive concrete structures, thermal-mechanical analysis, XFEM, thermal cracks, cohesive cracking model

1. INTRODUCCIÓN

El ACI define al hormigón masivo como cualquier volumen de hormigón con dimensiones lo suficientemente grandes como para tomar medidas que permitan hacer frente al calor generado por la hidratación del cemento y a los cambios volumétricos para minimizar la fisuración [1]. En la práctica los reglamentos establecen que la menor dimensión de la estructura de hormigón debe ser de 0.7m para ser considerada como masiva.

Entre las estructuras de hormigón masivo en la ingeniería civil pueden citarse las presas, bases de fundación, pilas de puentes y centrales de generación de energía [2].

Los cambios volumétricos mencionados anteriormente generan la aparición de tensiones de tracción, que si superan la resistencia a tracción del material pueden ocasionar fisuras que afectan la capacidad resistente de la estructura y su durabilidad, o simplemente su funcionamiento y estética. Por este motivo es importante poder predecir la evolución térmica del hormigón durante el proceso de hormigonado y los niveles de tensiones generados por dichas temperaturas para poder tomar medidas tendientes a evitar los problemas referidos.

Si bien se han propuesto distintos modelos que permiten predecir la historia térmica en las estructuras de hormigón y establecer el estado tensional asociado, estos consideran un comportamiento elástico lineal del material que condiciona el abordaje del problema al

establecer condiciones binarias respecto de la aparición o no de fisuras del tipo “*pasa/no pasa*”. Esto representa una limitación importante ya que no permite describir el proceso de iniciación y propagación de fisuras, lo cual impide establecer niveles de tolerancia al daño o entender el comportamiento de estructuras fisuradas por causas térmicas. Por lo que disponer de modelos que incorporen el fenómeno de la iniciación y propagación de fisuras en los problemas térmicos de las estructuras de hormigón es un aporte significativo tanto en el campo teórico como práctico.

En este trabajo se presentan los resultados correspondientes al estudio de la localización y evolución de fisuras de origen térmico, utilizando el Método de los Elementos Finitos Extendido (XFEM), basado en el método de los segmentos cohesivos, considerando la aleatoriedad presente en la resistencia a tracción del hormigón. En el apartado 2 se introducen las ecuaciones que gobiernan el fenómeno térmico, en el apartado 3 se explica en qué consiste el método utilizado y en el apartado 4 se describe el modelo numérico desarrollado. Por último, en los apartados 5 y 6, se analizan los resultados y se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2. ECUACIONES DE BALANCE TÉRMICO

Las observaciones experimentales indican que el flujo de calor es proporcional al gradiente térmico, siendo el factor de proporcionalidad la conductividad térmica del material, como se indica en la expresión siguiente [3]:

$$\vec{q} = -K \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (1)$$

en la que q es el vector de flujo de calor, K la matriz de conductividad y $\frac{\partial \theta}{\partial x}$ el vector gradiente de

temperaturas. La ecuación (2) representa la formulación diferencial, o fuerte, de la ecuación de balance térmico:

$$\rho \cdot \dot{U} = -\frac{\partial q}{\partial x} + r \quad (2)$$

en donde q es el flujo de calor a través de la superficie de control indicada en la Figura 1, r es el calor generado en el volumen de control, \dot{U} es la variación temporal de la energía interna y ρ es la densidad del material. Para integrar numéricamente la expresión (2) se la debe relajar multiplicando cada miembro por una temperatura variacional arbitraria $\delta\theta$, tal como se indica en (3):

$$\int_V \delta\theta \cdot \rho \cdot \dot{U} \cdot dV = -\int_V \delta\theta \cdot \frac{\partial q}{\partial x} \cdot dV + \int_V \delta\theta \cdot r \cdot dV \quad (3)$$

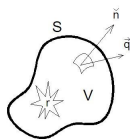


Figura 1. Volumen y superficie de control arbitrarios para la ecuación de balance térmico.

Operando sobre la expresión (3) se llega a la forma variacional de la ecuación de balance térmico indicada en (4):

$$\begin{aligned} \int_V \delta\theta \cdot \rho \cdot \dot{U} \cdot dV - \int_V q \cdot \frac{\partial \delta\theta}{\partial x} \cdot dV = \\ = \int_S q \cdot \delta\theta \cdot dS + \int_V \delta\theta \cdot r \cdot dV \end{aligned} \quad (4)$$

Para poder integrar numéricamente las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno físico hay que discretizar espacial y temporalmente el problema. Para ello, se parte de la expresión débil hallada anteriormente y se discretiza el volumen en elementos finitos, de forma tal que la temperatura en cualquier punto se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\theta(x) = N(x)^N \cdot \bar{\theta}^N \quad (5)$$

donde $N^N(x)$ son las funciones de interpolación y $\bar{\theta}^N$ son las temperaturas nodales.

Utilizando la aproximación de Galerkin, las temperaturas variacionales también son interpoladas a partir de las mismas funciones:

$$\delta\theta(x) = N(x)^N \cdot \delta\bar{\theta}^N \quad (6)$$

Introduciendo las interpolaciones (5) y (6) en la ecuación (4), reemplazando el flujo de calor q por la Ley de Fourier y operando se obtiene la expresión (7):

$$\begin{aligned} \int_V N^N \cdot \rho \cdot \dot{U} \cdot dV + \bar{\theta}^M \cdot \int_V K \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot dV = \\ = \int_V N^N \cdot r \cdot dV + \int_S N^N \cdot q \cdot dS \end{aligned} \quad (7)$$

que es la base para resolver problemas termo-mecánicos desacoplados unidimensionales mediante el MEF.

Cuando la energía interna del sólido no depende del campo de deformaciones o de tensiones, se puede escribir de acuerdo con la expresión (8):

$$\dot{U} = \frac{dU}{dt} = \frac{dU}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{dU}{d\theta} \cdot \dot{\theta} = c \cdot \dot{\theta} \quad (8)$$

siendo c el calor específico del material.

Tomando en cuenta la expresión (8), la ecuación (7) puede escribirse en forma matricial como se indica a continuación:

$$C \cdot \dot{\theta} + K \cdot \theta = Q \quad (9)$$

donde C es la matriz de capacidad calórica, K es la matriz conductividad, Q es el vector de flujo de calor y θ es el vector de temperaturas nodales.

Para problemas transitorios, además de espacialmente, se debe integrar la ecuación en forma temporal. Esto se consigue utilizando el algoritmo de diferencias regresivas indicado en (10):

$$\dot{U}_{t+\Delta t} = \frac{U_{t+\Delta t} - U_t}{\Delta t} \quad (10)$$

Reemplazando ahora el algoritmo (10) en la ecuación (7) resulta la expresión (11):

$$\frac{1}{\Delta t} \int_V N^N \cdot \rho \cdot (\dot{U}_{t+\Delta t} - \dot{U}_t) dV + \bar{\theta}_{t+\Delta t}^M \cdot \int_V k_{t+\Delta t} \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot dV - \int_V N^N \cdot r_{t+\Delta t} \cdot dV + \int_S N^N \cdot q_{t+\Delta t} \cdot dS = 0 \quad (11)$$

Este es un sistema de ecuaciones no lineal que se resuelve a través del Método de Newton modificado. Una vez obtenido el campo de temperaturas nodales, se puede obtener el campo de deformaciones del sólido a partir del coeficiente de expansión térmica del material α , como se indica en la expresión (12):

$$\varepsilon^{th} = \alpha \cdot (\theta - \theta^I) \quad (12)$$

donde θ es la temperatura en el tiempo $t + \Delta t$, y θ^I es la temperatura inicial en el tiempo t .

Las deformaciones elásticas del material se obtienen por diferencia entre las deformaciones totales y las deformaciones de origen térmico. Conocido el campo de deformaciones, las tensiones se calculan por aplicación de la Ley de Hooke.

3. METÓDO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO (XFEM) BASADO EN EL MÉTODO DE LOS SEGMENTOS COHESIVOS

El Método de los Elementos Finitos Extendido fue presentado primeramente por Belitschko y Black [4]. Es una extensión del Método de los Elementos Finitos basado en el concepto de partición de la unidad introducido por Melenk y Babuska [5], que permite incorporar funciones locales de enriquecimiento en un modelo de Elementos Finitos. Se asegura la presencia de discontinuidades gracias a las funciones de enriquecimiento en conjunto con grados de libertad adicionales.

Las funciones de enriquecimiento consisten en funciones asintóticas cercanas a la punta de la fisura, que permiten capturar las singularidades en dicha zona, y una función discontinua que representa el salto en el desplazamiento a través de la superficie de la fisura. Considerando lo anterior el vector desplazamiento, \mathbf{u} , queda definido de la siguiente manera [5]

$$\mathbf{u} = \sum_{I=1}^N N_I(x) [\mathbf{u}_I + H(x) \mathbf{a}_I + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x) \mathbf{b}_I^{\alpha}] \quad (13)$$

donde $N_I(x)$ representa las funciones de forma tradicionales, \mathbf{u}_I es el vector de desplazamientos nodales asociado con la parte continua de la solución de elementos finitos, \mathbf{a}_I es vector de grados de libertad nodales enriquecidos, $H(x)$ es la función discontinuidad asociada a \mathbf{a}_I a través de la superficie de la fisura, \mathbf{b}_I^{α} es el vector de grados de libertad nodales enriquecidos y $F_{\alpha}(x)$ son las funciones elásticas de la punta de la fisura asociadas a \mathbf{b}_I^{α} .

El primer término a la izquierda de la ecuación (13) es aplicable a todos los nodos en el modelo, el segundo es válido para nodos interceptados por el interior de la fisura y el tercer término se aplica a nodos interceptados por la punta de la fisura.

3.1. Predicción de la aparición de fisuras empleando el método de los segmentos cohesivos y el método de los nodos fantasma

Una alternativa dentro del marco de XFEM está basada en el comportamiento cohesivo de tracción-separación. El código de elementos finitos ABAQUS V6.14 utiliza esta alternativa para simular la iniciación y propagación de fisuras a lo largo de un camino arbitrario dependiente de la solución en el cuerpo del material, ya que la propagación de la fisura no está atada a los límites del elemento determinados por la malla. En este caso el producto $F_{\alpha}(x) * \mathbf{b}_I^{\alpha}$, que considera la singularidad en la punta de la fisura no es necesario, solo interesa el salto en el desplazamiento a través de un elemento fisurado, representado por $H(x) * \mathbf{a}_I$ [6].

Los nodos fantasma, superpuestos a los nodos reales originales, se introducen para representar la discontinuidad en los elementos fisurados, ver Figura 2

Cuando el elemento está intacto cada nodo fantasma está vinculado completamente a su correspondiente nodo real. Cuando el elemento es atravesado por una fisura, éste se divide en dos partes. Cada una de ellas queda formada por la combinación de algún nodo real y alguno fantasma, dependiendo de la orientación de la fisura. Cada nodo fantasma y su correspondiente nodo real no continúan vinculados y pueden separarse [6].

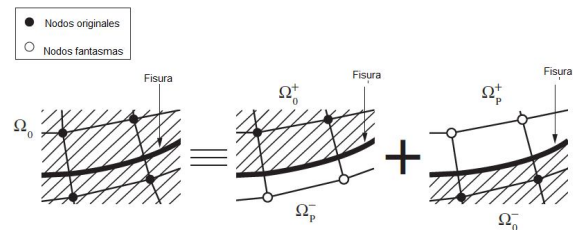


Figura 2. Principio del método de los nodos fantasma

La magnitud de la separación se encuentra gobernada por una ley cohesiva hasta que la resistencia cohesiva del elemento fisurado es igual a cero, después de lo cual el nodo fantasma y el real se separan. Para contar con un conjunto base para realizar la interpolación, la parte del elemento fisurado que pertenece al dominio real, Ω_0 , se extiende al dominio fantasma, Ω_p . Luego el desplazamiento en el dominio real puede interpolarse utilizando los grados de libertad para los nodos en el dominio fantasma. El salto en el campo de desplazamientos se realiza integrando sobre el área desde del nodo real hasta la fisura, es decir Ω_0^+ y Ω_0^- [6].

4. MODELO NUMÉRICO

4.1. Generalidades

El problema a estudiar consiste en la simulación de bases de hormigón con distinta relación largo-ancho. El período de análisis es de 100 días, durante los cuales la única acción sobre la estructura es debida al calor de hidratación del cemento. En la Tabla 1 se indican las distintas dimensiones consideradas.

Tabla 1. Dimensiones de las bases analizadas

Altura [m]	Largo [m]
1	4
2	4
2	8

Los fenómenos de transferencia de calor considerados incluyen convección entre la superficie de la base y el aire y conducción en la masa de hormigón. El modelo busca reproducir el fenómeno de fisuración a edad temprana en el hormigón utilizando XFEM basado en el método de los segmentos cohesivos, modelo que se encuentra implementado en el código de análisis por el Método de los Elementos Finitos ABAQUS V6.14.

4.2. Análisis realizados y parámetros del modelo

Para la resolución del problema se utilizó un modelo de análisis secuencialmente acoplado. Esto significa que el campo de tensiones depende del campo de temperaturas en el material, pero las temperaturas no dependen de las tensiones [3]. Por este motivo se realizó en primer lugar un análisis térmico con el objetivo de obtener la variación de temperaturas en el espacio y en el tiempo, para luego aplicarlas como estado de cargas a un modelo mecánico, el cual permite obtener las tensiones, deformaciones y esquemas de fisuración.

El modelo realizado es bidimensional. Se emplearon elementos lineales cuadriláteros de transferencia de calor de cuatro nodos (DC2D4) en el análisis térmico y elementos bilineales cuadriláteros de deformación plana e integración reducida de cuatro nodos (CPE4R) en el análisis mecánico. En la Tabla 2 se indican las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón utilizado.

Tabla 2. Propiedades del hormigón utilizado

Propiedades	
Densidad	2.40E-06 kg/mm ³
Conductividad	5.79E-07 kcal/mm.s.°C
Calor específico	2.30E-01 kcal/kg.°C
Coefficiente de convección hormigón-aire	1.6E-09 kcal/mm ² .s.°C
contenido unitario de cemento	3.80E-07 kg/mm ³
Resistencia media a la compresión a 28 días	38 MPa
Resistencia media a la tracción a 28 días	2.9 MPa
Módulo de elasticidad a 28 días	34000 MPa
Coefficiente de expansión térmica	1.19E-05 1/°C
Coefficiente de Poisson	2.00E-01 -
Peso de la unidad de volumen	2.40E-05 N/mm ³
Apertura crítica	6.55E-02 mm

Como se mencionó anteriormente el estado de carga considerado en el modelo térmico fue el calor de hidratación del cemento, el cual se ingresa como un flujo de calor por unidad de volumen y puede obtenerse de dos formas posibles. La primera de ellas es a partir de la curva de elevación adiabática del hormigón, resultado de un ensayo denominado Q Drum Test, y a partir de una expresión matemática se obtiene el mencionado flujo de calor volumétrico. La otra posibilidad consiste en calcularlo a partir de la expresión

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{t+12}\right)^\alpha} \quad (14)$$

en donde $Q(t)$ es el calor generado por kilogramo de cemento, Q_0 es la capacidad calórica del cemento, t es la edad en días y α y τ son parámetros de ajuste obtenidos experimentalmente [7]. Esta última alternativa fue la empleada en el presente trabajo.

Como se explicó en el apartado 3 el modelo mecánico empleado fue XFEM, basado en el método de los segmentos cohesivos. Este método requiere la definición de una curva de ablandamiento, que en el presente trabajo se adoptó de tipo lineal. Para definir la referida curva se necesitan: la resistencia a la tracción del material y la apertura crítica.

En lo que respecta a la resistencia a tracción del hormigón se consideró que ésta varía según una ley de distribución normal como la indicada en la Figura 3, con una resistencia media de 2.9 MPa y una desviación estándar de 0.4 MPa

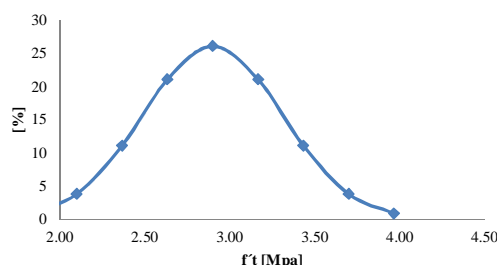


Figura 3. Distribución normal de valores de resistencia a tracción del hormigón para una resistencia media de 2.9MPa

En el presente trabajo se consideró la mencionada distribución normal de resistencia a la tracción del material mediante el desarrollo de un algoritmo en MATLAB que permite asignar aleatoriamente a distintas zonas de la estructura valores de resistencia a la tracción respetando la distribución mencionada. En la Figura 4 se observa lo comentado anteriormente para el caso de la base de 4m de ancho y 2m de alto. Los detalles de la implementación del referido algoritmo exceden los alcances del presente trabajo.

Cada uno de los grupos de colores presentes en la Figura 4 representa uno de los valores de resistencia a tracción abarcados por la curva de la Figura 3.

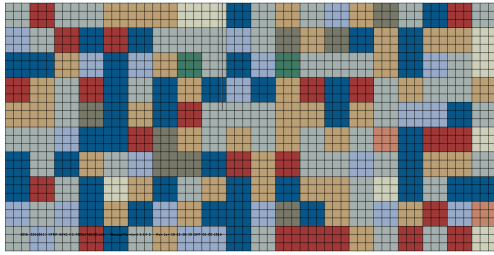


Figura 4. Asignación aleatoria del material en el elemento estructural

Para cada uno de los casos analizados se consideraron cinco asignaciones aleatorias de resistencia a tracción, lo cual permite otorgarle un enfoque probabilístico al problema analizado. Teniendo en cuenta lo anterior en la Figura 5 se presentan las curvas de ablandamiento utilizadas.

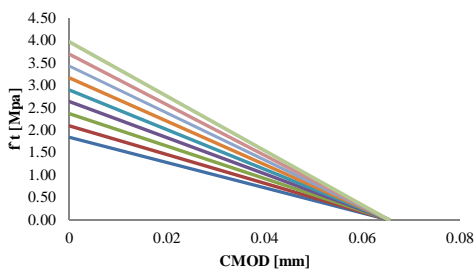


Figura 5. Curvas de ablandamiento utilizadas

Con respecto a las condiciones de contorno en el modelo térmico se consideró intercambio de calor unidireccional entre la base de hormigón y el aire y condiciones adiabáticas en el resto de las caras. La temperatura ambiente se consideró igual 15°C, constante durante todo el análisis y la temperatura de colocación del hormigón se adoptó igual a 20°C.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para cada una de las geometrías estudiadas, indicadas en la Tabla 1, en las Figuras 7, 8, 9 y 10 se muestran los patrones de fisuración obtenidos para cada uno de los arreglos propuestos. A su vez, en las Tablas 3, 4, 5 y 6 se presentan los parámetros analizados: longitud de la fisura, relación entre la longitud de la fisura y el canto, tiempo de aparición de la fisura y coordenadas de la punta de la fisura, medidas como se indica en la Figura 6.

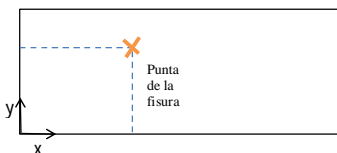


Figura 6. Coordenadas para la ubicación de la punta de la fisura

De la observación de los patrones presentados en la Figura 7 y de la relación longitud de la fisura/canto

indicada en la Tabla 3, se puede concluir que en la base de 4mx1m no se producen fisuras, ya que la mencionada relación es muy baja, menor al 10%, y el momento de la aparición de la fisura en general es muy tardío, alrededor de los 30 días, si se tiene en cuenta que se está analizando fisuración a edad temprana. Esto puede deberse a la baja temperatura de colocación (20°C) en relación a la temperatura ambiente (15°C) y las reducidas dimensiones de la base, que permiten una rápida disipación del calor generado.



Figura 7. Patrones de fisuración en la base 4mx1m empotrada, 1, 2, 3, 4 y 5 corresponden a las fisuras para los arreglos 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente

Tabla 3. Parámetros analizados base 4mx1m empotrada

Dimensiones base [m]	N° de arreglo	Ubicación punta de fisura		Longitud de la fisura [m]	Relación Long fisura/Canto [%]	Tiempo de aparición [días]
		x [m]	y [m]			
4x1	A1	3.60	0.07	0.09	9%	1.04
	A2	0.08	0.00	0.09	9%	32.02
	A3	0.08	0.00	0.09	9%	27.62
	A4	3.92	0.00	0.09	9%	30.40
	A5	3.92	0.00	0.09	9%	32.25

Para el caso de la base de 4mx2m las fisuras se generan claramente si se observan las Figuras 7 y 8 y las Tablas 4 y 5, ya que para el caso empotrado la relación longitud de fisura/ canto se encuentra en el entorno del 40% y en el caso simplemente apoyada alrededor del 20%. A su vez el tiempo de aparición de la fisura, en ambos casos, ocurre al día y medio a los 2 días, lo cual representa adecuadamente el fenómeno de fisuración a edad temprana.

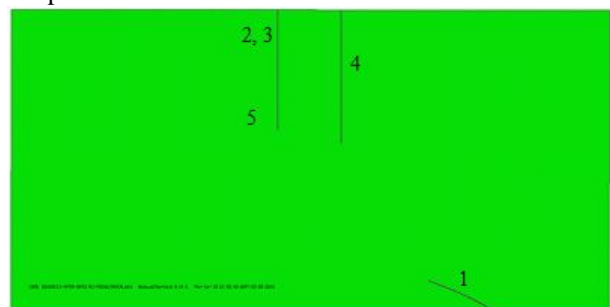


Figura 7. Patrones de fisuración en la base 4mx2m empotrada, 1, 2, 3, 4 y 5 corresponden a las fisuras para arreglos 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente

Tabla 4. Parámetros analizados base 4mx2m empotrada

Dimensiones base [m]	N° de arreglo	Ubicación punta de fisura		Longitud de la fisura [m]	Relación Long fisura/Canto [%]	Tiempo de aparición [días]
		x [m]	y [m]			
4x2	A1	2.80	0.20	0.45	22%	1.90
	A2	1.77	1.13	0.87	43%	1.69
	A3	1.77	1.13	0.87	43%	1.58
	A4	2.23	1.13	0.87	43%	1.92
	A5	1.77	1.20	0.80	40%	1.69

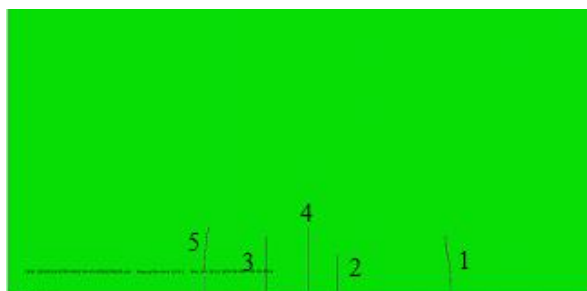


Figura 8. Patrones de fisuración en la base 4mx2m simplemente apoyada, 1, 2, 3, 4 y 5 corresponden a las fisuras para arreglos 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente

Si se comparan la forma de los patrones para las dos condiciones de borde analizadas, empotrada y simplemente apoyada, se observa que para el primer caso las fisuras se ubican, en general, para todos los arreglos en la parte superior de la base, y en el caso simplemente apoyado se encuentran en la parte inferior. Esto se relaciona con el hecho que para esta última condición de contorno se permite la libre expansión y contracción de la base. La aparición de una fisura en la parte inferior para el caso empotrada, puede estar relacionada con la existencia de resistencia a la tracción más baja en esa zona, resultado de la distribución aleatoria generada en el arreglo.

Tabla 5. Parámetros analizados base 4mx2m simplemente apoyada

Dimensiones base [m]	N° de arreglo	Ubicación punta de fisura		Longitud de la fisura [m]	Relación Long fisura/Canto [%]	Tiempo de aparición [días]
		x [m]	y [m]			
4x2	A1	3.00	0.40	0.40	20%	1.43
	A2	2.23	0.30	0.27	13%	1.64
	A3	1.77	0.40	0.40	20%	1.64
	A4	2.03	0.47	0.47	23%	1.79
	A5	1.40	0.47	0.47	23%	1.68

Finalmente para la base de 8mx2m empotrada se presentan los patrones de fisuración para los distintos arreglos estudiados en la Figura 8. A partir de la Tabla 5 puede concluirse que la base se encuentra efectivamente fisurada, ya que la relación longitud de fisura/canto, en general, ronda el 30% y la aparición de las fisuras ocurre alrededor de la edad de un día, lo cual corresponde a fisuras a edad temprana. En comparación con los patrones de fisuración observados para la base de 4mx2m empotrada, puede decirse que en ese caso las fisuras son más largas que para la base de 8mx2m.



Figura 8. Patrones de fisuración en la base 8mx2m empotrada, 1, 2, 3, 4 y 5 corresponden a las fisuras para arreglos 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente

Tabla 5. Parámetros analizados base 8mx2m empotrada

Dimensiones base [m]	N° de arreglo	Ubicación punta de fisura		Longitud de la fisura [m]	Relación Long fisura/Canto [%]	Tiempo de aparición [días]
		x [m]	y [m]			
8x2	A1	1.33	1.73	0.27	14%	0.65
	A2	1.07	1.40	0.60	30%	0.85
	A3	1.13	1.33	0.68	34%	0.61
	A4	6.93	1.40	0.60	30%	0.72
	A5	0.87	1.33	0.68	34%	0.85

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se utilizó exitosamente un modelo XFEM basado en el método de los segmentos cohesivos para predecir los patrones de fisuración a edad temprana en distintas geometrías de bases de hormigón masivo. A su vez se consideró en el mencionado modelo la aleatoriedad en la distribución de resistencias mediante un algoritmo desarrollado en MATLAB. Esto último representa la novedad de la implementación de una herramienta muy poderosa que permite introducir el análisis probabilístico en un análisis numérico.

REFERENCIAS

- [1] ACI 116R-78, Cement and Concrete Terminology, Reported by ACI Committee 116, p. 27, 1978.
- [2] ACI 224R-01, Control of Cracking in Concrete Structures, Reported by ACI Committee 224, p. 28, 2001.
- [3] ABAQUS, Heat Transfer Theory Appendix I, Dassault Systems Simulia Corp., 2006.
- [4] Belytschko, T., and T. Black, Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 45, pp. 601–620, 1999.
- [5] Melenk, J., and I. Babuska, The Partition of Unity Finite Element Method: Basic Theory and Applications, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 39, pp. 289–314, 1996.
- [6] ABAQUS, ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.14, Dassault Systems Simulia Corp., Vol 2, pp 805-806, 2014.
- [7] U.S. Army Corps of Engineers, Thermal Studies of Mass Concrete Structures, Technical Letter No. 1110-2-542, 1997.