

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS NO LINEALES PARA EL ANÁLISIS DEL PROCESO DE FISURACIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Zappitelli, M. Paula¹, Villa, Ignacio¹, Rocco, Claudio¹

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

Palabras clave: Modelos no lineales, hormigón, fisuración por contracción, estados tensionales uniformes

1. INTRODUCCIÓN

Para el estudio numérico del proceso de fisuración en estructuras de hormigón es necesario utilizar modelos no lineales que permitan determinar tanto la edad de fisuración, como la localización de dichas fisuras.

Si el hormigón recientemente endurecido e independientemente de que esté sometido o no a la acción de cargas externas es expuesto a la temperatura ambiente y a la humedad generalmente sufre una contracción térmica, debido a los gradientes de masa y de superficie que se generan como consecuencia del calor liberado durante la hidratación del cemento. A su vez, debido a la pérdida de humedad de la mezcla que tiene lugar durante el proceso de fraguado, el hormigón también sufre una contracción por secado [1]. Dependiendo de la geometría analizada (espesor, superficie expuesta, forma), este tipo de fenómenos generan estados tensionales uniformes en las estructuras.

En el presente trabajo se propone comparar los resultados obtenidos con el Modelo de fisuración cohesiva, un modelo de plasticidad con daño y el Método de los elementos finitos extendido (XFEM), para determinar cuál de estos modelos es el más adecuado para simular el proceso de fisuración en una estructura de hormigón masivo.

En el segundo apartado se describen brevemente los modelos mencionados. Luego, en el tercer apartado se presenta el problema analizado y los parámetros requeridos por cada uno de los modelos. Por último, en el cuarto apartado se analizan los resultados obtenidos y en el quinto apartado se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2. MODELOS NO LINEALES ANALIZADOS

Modelo de fisuración cohesiva (MFC)

El Modelo de Fisura Cohesiva (MFC) considera la existencia de una fisura ficticia capaz de transmitir tensiones a través de sus caras. Este modelo se basa en dos cuestiones, por un lado, considerar que al someter a una probeta de hormigón a un estado de tracción uniaxial, luego de alcanzar la carga pico todas las deformaciones se localizan en la fisura que divide a la probeta en dos partes. Por otro lado, tener en cuenta la evolución de la fisura desde la probeta en estado intacto hasta la rotura, [2].

Estas consideraciones demostraron que la transición desde un valor máximo de la tensión hasta un valor nulo es gradual y no instantánea. Además, luego de la carga pico las deformaciones se localizan en una región muy angosta, la cual se convertirá en una fisura visible, mientras que el resto del sólido permanecerá descargado. La tensión transferida a través de la fisura (σ) es función de su apertura (w), $\sigma = f(w)$. $f(w)$ es una función característica del material y se denomina función de ablandamiento [2], [3].

Modelos de plasticidad con daño

Los modelos basados en plasticidad permiten modelar el comportamiento del hormigón bajo un estado triaxial de tensiones. La separación de las deformaciones en su parte elástica y plástica representa en forma realista las deformaciones que se observan en compresión confinada, [4-5].

Los modelos de mecánica de daño se basan en el concepto de reducción gradual de la rigidez. Para modelos continuos de la mecánica de daño basados en deformaciones, el proceso de evaluación de las tensiones es explícito, lo cual permite una determinación directa del estado tensional, sin la realización de un proceso de cálculo iterativo. Estos modelos describen adecuadamente la degradación de la rigidez en tracción y bajo cargas bajas de compresión confinada concordando con los resultados observados en los ensayos de laboratorio, [6-7].

Sin embargo, los modelos basados en plasticidad no pueden describir la reducción de la rigidez frente a la descarga observada en ensayos reales. Por otro lado, los modelos de daño continuo no permiten considerar las deformaciones irreversibles, y se encuentran principalmente limitados a estados de tracción y bajos valores de compresión confinada. Por este motivo, la combinación de plasticidad y mecánica de daño continuo permiten modelar en forma adecuada el comportamiento no lineal del hormigón, ya que en este caso se tienen en cuenta las deformaciones irreversibles luego del proceso de descarga y la degradación de la rigidez, [8-9].

Modelos de los elementos finitos extendido (XFEM)

La modelación del proceso de propagación de fisuras utilizando una malla de elementos finitos resulta ser un problema complejo debido a que debe discretizarse la discontinuidad y la punta de la fisura en forma precisa, y además incluirse modificaciones en la topología de la malla que permitan simular el proceso de propagación de la fisura a medida que avanza el análisis. Esto representa una operación costosa, desde el punto de vista computacional, pero también puede tener un impacto negativo en la calidad de los resultados. En este contexto surge XFEM, método en el que el crecimiento de las fisuras puede modelarse sin remallado, en el cual las fisuras se representan a través de funciones de enriquecimiento, [10]. XFEM representa una extensión del Método de los Elementos Finitos convencional basada en el concepto de partición de la unidad, según el cual la suma de las funciones de forma debe ser igual a uno, [11].

3. PROBLEMA ANALIZADO

Para comparar el funcionamiento de los modelos estudiados se propone analizar el proceso de fisuración de un elemento masivo de hormigón de 6 m de largo y 2 m de altura, empotrado en su base y sometido a una contracción uniforme representada mediante una variación de temperatura de -40°C a lo largo de 5 días. Las propiedades mecánicas del hormigón utilizado se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del hormigón analizado

Propiedades Mecánicas del hormigón	
f_{c28}	38 MPa
f_{ct28}	2.9 MPa
E_{28}	34000 MPa
α	$1e-5 \frac{1}{^{\circ}C}$
ν	0.2
δ	$2.45e-5 \text{ Kg/m}^3$
w_c	0.0655 mm

Es importante mencionar que cada uno de los modelos requiere la adopción de propiedades adicionales las cuales se indican a continuación.

Modelo de fisuración cohesiva (MFC)-Elementos cohesivos

En este caso es necesario definir un valor de rigidez (K) tal que asegure que la contribución del elemento cohesivo a la deformación global de la estructura sea lo suficientemente pequeña comparada con la deformación volumétrica obtenida a partir de las ecuaciones constitutivas. De esta forma se asegura una conexión rígida entre los elementos finitos convencionales, vinculados entre sí mediante los elementos cohesivos, antes que comience el proceso de fisuración, [12]. A partir de una serie de simulaciones se adoptó un valor de K igual a 100 veces el valor del módulo de elasticidad.

Por otro lado, se adoptó una ley de ablandamiento lineal, se utilizaron 10117 elementos CPS4 (elementos cuadrados de cuatro nodos en tensión plana) y 4958 elementos COH2D4 (elementos cohesivos de cuatro nodos). Como al inicio del análisis no se conoce el lugar de aparición de la fisura se incorporaron elementos cohesivos en todas las interfases verticales de la malla de elementos finitos.

Modelo de plasticidad con daño

Este modelo requiere una serie de parámetros adicionales que se indican a continuación. ω (35°) representa el ángulo de fricción interna, e (1) es la excentricidad, es decir, la tasa a la cual la función de flujo plástico alcanza la asíntota, σ_{b0}/σ_c (1.2) es la relación entre la tracción y la compresión biaxial y K (0.67) es un factor que representa la relación entre el segundo invariante de la tensión en el meridiano de tracción respecto al meridiano de compresión en la fluencia inicial, para cualquier valor del invariante de presión. En este caso se utilizaron 4800 elementos CPS4 (cuadrados de cuatro nodos en tensión plana). Se utilizaron una ley tensión-desplazamiento y de daño lineales.

Los modelos de comportamiento de materiales que presentan ablandamiento y degradación de rigidez a menudo tienen severos problemas de convergencia en programas de análisis implícito. Algunas de estas dificultades pueden resolverse utilizando regularización viscoplástica de las ecuaciones constitutivas. En el caso del modelo analizado esta regularización viscoplástica permite que las tensiones se encuentren por fuera de la superficie de fluencia. Se adoptó un valor igual a $2E^{-8}$, [13]

Método de los elementos finitos extendidos (XFEM)

La aplicación del método XFEM consiste en el enriquecimiento de los nodos de la malla de elementos finitos a partir de la definición de una nueva función de forma para los mismos. La geometría del problema analizado está constituida por una única parte, por lo que se aplica un único enriquecimiento en la misma.

Se utilizaron 4800 elementos CPS4 (cuadrados de cuatro nodos en tensión plana), se adoptó una ley de ablandamiento lineal y un coeficiente de regularización viscoplástica igual a 0.01.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Modelo de fisuración cohesiva (MFC)

Para estimar el tiempo de aparición de fisuras se determinó en los elementos cohesivos la variable SDEG, la cual varía entre 0 y 1. El valor 1 representa a un elemento cohesivo

completamente abierto, es decir, cuando la fisura deja de ser ficticia y pasa a representar una fisura real. En la Figura 1 se presenta el patrón de fisuración obtenido.

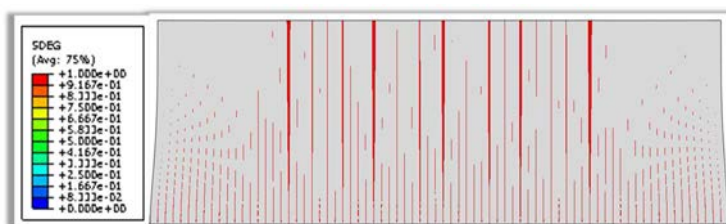


Figura1. Patrón de fisuración obtenido empleando MFC

Se observa que en todas las zonas en las que se colocaron elementos cohesivos la variable SDEG alcanzó el valor 1, lo cual significa que en esas zonas aparecieron fisuras. Si en el problema analizado se coloca menor cantidad de elementos cohesivos se obtiene una menor cantidad de zonas fisuradas, ya que para este problema siempre se activan todos los elementos cohesivos. Esto se comprobó a través de distintas simulaciones. Por este motivo los resultados obtenidos, para el problema analizado, dependen de la cantidad de interfases en las que se encuentran presentes este tipo de elementos.

Modelo de plasticidad con daño

Se ha demostrado que este modelo de plasticidad con daño es dependiente del tamaño de la malla por lo que se realizó un análisis de sensibilidad para evitar la influencia del tamaño de los elementos en los resultados. Se consideraron elementos cuadrados de 150 mm, 100 mm, 50 mm, 40 mm, 25 mm y 12.5 mm de lado. A partir de la utilización de elementos de 50 mm de lado no se observan variaciones considerables en los resultados, ver Tabla 2. Por este motivo la longitud de lado de los elementos utilizados en el análisis fue de 50 mm.

Por tratarse de un modelo continuo no tiene incorporado el concepto de desarrollo de fisuras en el punto de integración material. Sin embargo, pueden definirse zonas dañadas medidas mediante la variable de daño en tracción DAMAGET, la cual varía entre 0 y 1, representando este último valor una zona completamente dañada, ver Figura 2.

Tabla 2. Análisis de sensibilidad de malla Modelo de plasticidad con daño. Edad de fisuración

Longitud del lado del elemento [mm]	Tiempo de aparición fisuras [hs]
150	45.6
100	42.24
50	32.16
40	31.94
25	32.4
12.5	32.22

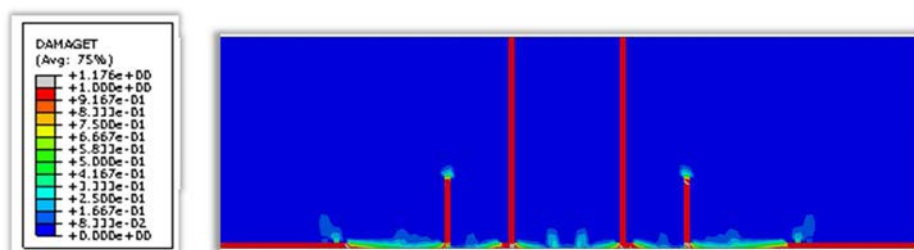


Figura 2. Variable de daño del bloque en estudio

A partir del análisis realizado se observa una zona dañada en el lado inferior del bloque, correspondiente con la ubicación del empotramiento, ya que la restricción impuesta por el mismo genera el desarrollo de tensiones altas que superan la resistencia a tracción. Se observa que esas zonas dañadas progresan hacia el interior del bloque, alcanzando el lado superior del mismo.

Método de los elementos finitos extendido (XFEM)

En la zona inferior del bloque se generan tensiones altas debido a la restricción provocada por el empotramiento, por lo que se supera el criterio de inicio de daño, lo cual da lugar a la aparición de dos fisuras en los extremos inferiores, como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Patrón de fisuración obtenido aplicando XFEM para el bloque en estudio

XFEM solo permite la aparición de una fisura por enriquecimiento, a menos que sean varias fisuras simultáneas. Esto significa que en el problema que se analizó no podrán evidenciarse otras fisuras, además de las generadas en los extremos del empotramiento, aunque en otras zonas se alcance el criterio de inicio de daño, ya que ABAQUS solo permite definir un enriquecimiento en este problema.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propone determinar el modelo más adecuado para el estudio del proceso de fisuración en estructuras de hormigón sin presencia previa de defectos y sometidas a un estado tensional uniforme, por ello el problema que se propuso estudiar fue el de un elemento masivo de hormigón intacto sometido a contracción térmica.

A partir de los resultados obtenidos puede concluirse que el método XFEM con un solo enriquecimiento no es adecuado, ya que solo permite que en cada enriquecimiento se genere una fisura, o más de una siempre y cuando las mismas ocurran de manera simultánea, [14]. En el caso analizado solo puede definirse un enriquecimiento, ya que no se dispone de un criterio para determinar una subdivisión que permita mantener la mayor generalidad posible en el problema. Por este motivo al generarse las fisuras en la proximidad de los apoyos debido a un efecto de borde, queda vedada la posibilidad de aparición de una fisura adicional no simultánea con las mismas.

En cuanto a la utilización del Modelo de Fisuración Cohesiva, mediante el empleo de elementos cohesivos, puede decirse que la implementación del mismo en una estructura inicialmente intacta es considerablemente trabajosa, ya que implica la incorporación de elementos cohesivos en todas las interfases de los elementos convencionales. En el problema analizado únicamente se incorporaron en la dirección vertical, lo cual obliga a la utilización de una malla de elementos finitos relativamente fina con una gran cantidad de elementos, 15075 elementos frente a 4800 elementos en las mallas de los modelos XFEM y de plasticidad con daño, dando lugar a un considerable aumento del tiempo de cálculo. Además, los resultados obtenidos con este modelo para el caso analizado, dependen de la cantidad de interfases con elementos cohesivos utilizadas, ya que la estructura se encuentra intacta, es decir, sin fisuras, entallas o defectos previos.

Finalmente, si bien el modelo de plasticidad con daño es un modelo continuo que no permite definir el camino de la fisura, sino zonas dañadas, su implementación puede llevarse a cabo con mayor generalidad, al ser aplicado directamente a las propiedades del material en toda la masa de la estructura, sin la necesidad de definir un enriquecimiento en la misma, como en el caso de XFEM o adoptar un criterio para definir la cantidad de interfases con elementos cohesivos a utilizar. Además, las zonas dañadas permiten inferir los lugares en donde aparecerán fisuras. Por este motivo se concluye que el modelo de plasticidad con daño es el más adecuado para estudiar el fenómeno de fisuración por contracción en estructuras de hormigón inicialmente sin defectos y sometidas a estados tensionales uniformes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Kumar Metha, Paulo J. M. Monteiro. Concreto, estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. 1998.
- [2] A. Hillerborg, M. Modéer y P. E. Petersson. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and Finite elements. Cement concrete research, vol. 6, páginas 773-782, 1976.
- [3] ABAQUS. ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume IV: Elements. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013.
- [4] K. Willam y E Warnke. Constitutive model for the triaxial behavior of concrete. Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, IABSE Report, vol. 19, páginas 1-30, 1974.
- [5] G. Etse y K. Willam A fracture-energy based constitutive formulation for inelastic behavior of plain concrete. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, vol. 120, páginas 1983-2011, 1994.
- [6] M. Kachanov. Continuum model of medium with cracks. Journal of the Engineering Mechanics Division, vol. 106, páginas 1039-1051, 1980.
- [7] G. Voyiadjis. Z. Taqieddin. Y P. Kattan. Anisotropic damage plasticity model for concrete. International Journal of Plasticity, vol. 24, páginas 1946-1965, 2008.
- [8] P. Grassl, X. Xenos, U. Nystrom, R. Rempling y K. Gylltoft. CDPM2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete. International Journal of Solids and Structures, vol. 50, páginas 3805-3816, 2013.
- [9] O. Omidí, y V. Lotfi. Finite element analysis of concrete structures using plastic-damage model in 3-D implementation. International Journal of Civil Engineering, vol. 8 (3), páginas 187-203, 2010.
- [10] T. Belytschko y T. Black. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. International journal for numerical method in engineering, vol. 45, páginas 601-620, 1999.
- [11] J. Melenk y I. Babûska. The partition of unity finite element method: Basic theory and applications. Computer method in applied mechanics and engineering, vol. 139, páginas 289-314, 1996.
- [12] A. Turon, C. G. Dávila, P. P. Camanho y J. Costa. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. Engineering fracture mechanics, vol. 74, páginas 1665-1682, 2007.
- [13] ABAQUS. ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume III: Materials. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013.
- [14] ABAQUS. ABAQUS 6.13 Analysis User's Manual Volume II: Analysis. Dassault Systèmes Simulia Corp., 2013.