

APLICACIÓN DE UN MODELO CON ASIGNACIÓN ALEATORIA DE PROPIEDADES AL ESTUDIO DE FENÓMENOS DE CONTRACCIÓN EN HORMIGÓN SIMPLE

M. P. Zappitelli^{1,2}, G. Sal Anglada¹, E. I. Villa¹, C. G. Rocco¹

¹Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina

²Consejo Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET) CCT La Plata. Calle 8 N° 1467, (B1904CMC), La Plata, Buenos Aires, Argentina
paula.zappitelli@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Las deformaciones en el hormigón, que dependiendo de su magnitud pueden provocar la fisuración del material, ocurren en general como resultado de la respuesta a las cargas externas y a la acción de diversos agentes presentes en el medio ambiente. En efecto, cuando 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].

Debido a la importancia de este fenómeno, se han desarrollado numerosos ensayos para estudiar cómo las propiedades del material afectan a la fisuración por contracción. Uno de ellos es el ensayo de anillo de contracción restringida, descrito en la norma *ASTM C 1581* (Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage).

En este trabajo se presenta el algoritmo desarrollado por los autores en Matlab que permite considerar la aleatoriedad presente en las propiedades mecánicas del hormigón. Esto último se puede considerar como un criterio de localización para el estudio de fisuración en estructuras inicialmente intactas. Para validar la aplicación del mismo se llevó a cabo la simulación numérica del ensayo *ASTM C 1581* en anillos circulares y elípticos utilizando el modelo "*Concrete Damaged Plasticity (CDP)*" disponible en el código Abaqus/Standard. Las salidas del algoritmo son datos de entrada para el modelo CDP. Los resultados obtenidos se compararon con los disponibles en la bibliografía [2]. En el segundo apartado se explican el ensayo *ASTM C 1581*. Por otro lado, en el tercer apartado se introduce el modelo constitutivo utilizado y en el cuarto apartado se describe la asignación aleatoria del material. En el quinto apartado se presenta el modelo numérico. Por último, en los apartados sexto y séptimo, se analizan los resultados y se presentan las principales conclusiones del trabajo.

ENSAYO ASTM C 1581

La norma *ASTM C 1581* establece una metodología de ensayo para la determinación de la edad de fisuración y las tensiones de tracción inducidas en probetas de mortero u hormigón sometidas a contracción restringida.

El ensayo consiste en compactar en un molde circular una muestra de mortero u hormigón fresco alrededor de un anillo de acero. Luego la deformación por compresión que se desarrolla en el anillo de acero causada por la contracción restringida de la probeta de mortero u hormigón se mide a partir del momento en que la probeta ha sido moldeada. Esta norma utiliza anillos de acero de 12.5mm de espesor, y anillos de hormigón de 405mm de diámetro externo, 330mm de diámetro interno y 37.5mm de espesor, como se observa en la Figura 1.

La fisuración de la probeta se evidencia mediante un repentino decrecimiento en la deformación del anillo de acero. A su vez, la edad a la que se produce la fisuración y la tasa

de desarrollo de las tensiones de tracción en la probeta son indicadores de la resistencia del material a la fisuración bajo contracción restringida [3].

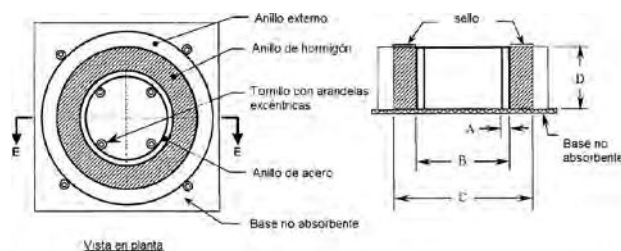


Figura 1. Dimensiones de la probeta del ensayo ASTM C 1581

MODELO CONSTITUTIVO

Como modelo constitutivo del hormigón se ha utilizado el denominado *Concrete Damaged Plasticity* (CDP). Se trata de un modelo de tipo continuo que considera daño y está basado en la teoría de la plasticidad. Se supone además la existencia de dos mecanismos de rotura: fisuración cuando el hormigón se encuentra sometido a tensiones de tracción y aplastamiento cuando se encuentra bajo la acción de tensiones de compresión. La evolución de la superficie de fluencia está controlada por dos variables de endurecimiento, \tilde{e}_t^{pl} y \tilde{e}_c^{pl} , las cuales se encuentran vinculadas a los mecanismos de falla bajo cargas de tracción y compresión respectivamente. Las variables \tilde{e}_t^{pl} y \tilde{e}_c^{pl} se definen como deformaciones plásticas equivalentes en tracción y compresión [4].

La respuesta tensión-deformación bajo cargas uniaxiales sigue una relación elástica lineal hasta alcanzar el valor de la tensión de rotura (s_{t0}), la cual se corresponde con el inicio de la microfisuración en el hormigón. Superada la tensión de rotura, la formación de microfisuras se representa macroscópicamente a través de un ablandamiento en la respuesta tensión-deformación, el mismo induce la localización de las deformaciones en la estructura del hormigón. Bajo la acción de compresión uniaxial la respuesta es de tipo lineal hasta que se alcanza la tensión de fluencia inicial (s_{c0}). En régimen plástico la respuesta se encuentra caracterizada por un endurecimiento de las tensiones seguido por un ablandamiento en las deformaciones luego de superada la tensión última (s_{cu}) [4].

Se asume que las curvas tensión-deformación uniaxial pueden convertirse en curvas tensión-deformación plástica empleando las expresiones (1) y (2)

$$\tilde{\varepsilon}_t^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (1)$$

$$\tilde{\varepsilon}_c^{pl} = \tilde{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (2)$$

Donde \tilde{e}_t^{pl} y \tilde{e}_c^{pl} son las deformaciones plásticas equivalentes en tracción y compresión, \tilde{e}_t^{ck} es la deformación por fisuración, \tilde{e}_c^{in} es la deformación inelástica, d_t y d_c son las variables de daño en tracción y compresión, s_t y s_c las tensiones de tracción y compresión y E_0 es el módulo de elasticidad del material sin daño. Las variables de daño, d_t y d_c , son funciones de las deformaciones plástica y la temperatura y pueden tomar valores entre 0 y 1.

ASIGNACIÓN ALEATORIA DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

Si bien en general la resistencia del hormigón se ajusta a una distribución probabilística, en los modelos numéricos se utiliza la resistencia media a tracción o compresión como parámetro de referencia. Con el objetivo de darle al análisis un enfoque más realista se ha

desarrollado un algoritmo en Matlab que permite asignar a diferentes regiones del modelo numérico diferentes valores de la resistencia a tracción o compresión, de acuerdo con una distribución probabilística. Esta asignación se realiza definiendo dos mallas, una denominada malla de material y otra denominada malla convencional de elementos finitos, esta última es la obtenida a partir de cualquier código de elementos finitos.

El algoritmo desarrollado en Matlab permite agrupar los elementos de la malla de elementos finitos en la cercanía de los nodos de la malla de material, con el objetivo de definir zonas a las cuales se asignarán diferentes valores de la resistencia a la tracción de acuerdo con la distribución de Weibull. La mencionada asignación se realiza empleando números aleatorios. El usuario puede realizar distintos sorteos de números aleatorios y obtener para cada uno de ellos configuraciones no uniformes de la resistencia a tracción o compresión en la estructura para una dada distribución de probabilidad.

En la Figura 2 se observa a la izquierda la malla de elementos finitos convencional y a la derecha la malla de material. La separación nodal en la malla de material queda determinada considerando 3 veces el tamaño máximo del agregado, en este caso la separación adoptada fue de 30mm, para un tamaño máximo de agregado de 10mm.

En la Figura 3 se observan cinco configuraciones de distribución de resistencia obtenidas con el algoritmo desarrollado en Matlab

El objetivo de realizar esta asignación aleatoria de las propiedades del material utilizando una distribución probabilística de la resistencia, es definir un criterio que permita definir zonas preferentes de fisuración en una estructura inicialmente intacta, es decir, sin ningún tipo de fisura o entalla. Esto también permite aportarle más realidad al análisis, ya que en las simulaciones convencionales empleando elementos finitos se utilizan propiedades uniformes en toda la geometría. Además al resolver el mismo problema empleando diferentes configuraciones no uniformes de resistencia se puede llevar a cabo un análisis estadístico de los resultados.



Figura 2. Malla de elementos finitos convencional (izq.), malla de material (der.)

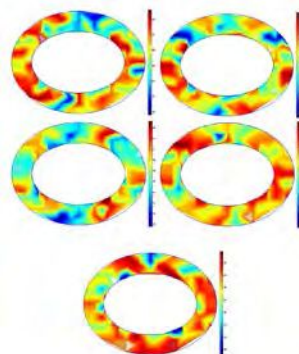


Figura 3. Configuraciones de distribución de resistencias

MODELO NUMÉRICO

Generalidades

Para la validación del algoritmo desarrollado se aplicaron las diferentes configuraciones de resistencia obtenidas con el mismo como datos de entrada para el modelo CDP para la simulación numérica del ensayo ASTM C 1581.

Los casos estudiados corresponden a un anillo circular y un anillo elíptico. En la Tabla 1 y en la Figura 4 se indican las dimensiones de los anillos. Para cada uno de ellos se realizó un análisis lineal y un análisis CDP utilizando material uniforme y material con distribución aleatoria de propiedades. Se compararon los resultados obtenidos con los resultados experimentales disponibles en [2]. El tiempo de análisis fue de 28 días.

Anillos	Dimensiones	
	a	b
	[mm]	[mm]
150x150	150	-
150x100	150	100

Tabla 1. Geometrías analizadas

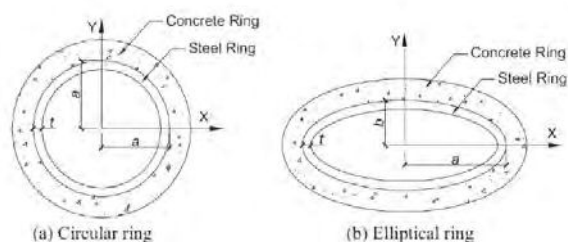


Figura 4. Geometrías analizadas

Análisis realizado y parámetros del modelo

El análisis realizado fue bidimensional. El estado de carga empleado consistió en una temperatura equivalente obtenida a partir de ensayos de contracción libre [5] en probetas prismáticas con distinta relación A/V (área expuesta/ volumen total), para simular distintas condiciones de exposición, como se indica en [2].

En cuanto a las propiedades del material, tanto la resistencia a tracción, como la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad varían en el tiempo, ya que el fenómeno estudiado es la fisuración a edad temprana. Esta condición se incorporó a las simulaciones realizadas en cada una de las configuraciones de resistencia obtenidas con el algoritmo desarrollado. A continuación se indican las ecuaciones correspondientes a cada una de las propiedades mecánicas.

$$E(t) = 16940.2(\exp^{0.28*(1-(20/t)^{0.5})})^{0.5} \quad (3)$$

$$f'_c(t) = 38(\exp^{0.28(1-28/t)^{0.5}}) \quad (4)$$

$$f'_t(t) = 1.3((f'_c/12)^{1/3})^{1.45} + 1.45 \quad (5)$$

El desplazamiento crítico se adoptó igual a 0.0655 mm, la ley de ablandamiento y la ley de daño para el hormigón se adoptaron lineales y el valor del módulo de Poisson igual a 0.2. El módulo de elasticidad se redujo en un 20% para considerar los efectos del creep [2,6]. En cuanto a los parámetros de la distribución de Weibull se utilizó un coeficiente de forma igual a 12 y un parámetro de escala igual a 39.46 MPa [7].

El módulo de elasticidad adoptado para el acero fue 210000 MPa y el coeficiente de Poisson 0.3.

RESULTADOS

Con el objetivo de determinar la edad de aparición de la primera fisura en el modelo numérico se obtuvo la tensión circunferencial en cuatro elementos del anillo de acero

ubicados en radios opuestos. El salto en la medición de dichas tensiones determina la edad de aparición de la primera fisura. En el caso de la aplicación del modelo CDP considerando asignación aleatoria de propiedades fueron analizadas cinco configuraciones de la resistencia a tracción.

Tiempo de aparición de fisuras

Los resultados del tiempo de aparición de fisuras tanto para las simulaciones numéricas como los obtenidos de ensayos experimentales [2] se presentan en las Tablas 2, para el análisis lineal, 3 para el análisis CDP con material uniforme y 4 para el análisis CDP con material aleatorio.

Puede observarse en las tablas mencionadas que los menores errores en relación a los valores experimentales se obtienen para los casos resueltos utilizando CDP con material con distribución aleatoria de propiedades, tanto para el anillo circular como el elíptico. Al utilizar CDP con material uniforme en el caso del anillo elíptico no se registra la aparición de fisuras. Por otro lado los resultados obtenidos con el modelo lineal presentan mayores errores en relación a los resultados experimentales.

Anillos	Tiempo de aparición de la primera fisura [días]		
	Ensayos	Análisis lineal	
		Calculado	Dif con experimental
150x150	14.5	13	-1.5
150x100	14.5	12.82	-1.7

Tabla 2. Tiempo de aparición de fisura- Análisis lineal

Anillos	Tiempo de aparición de la primera fisura [días]		
	Ensayos	Análisis CDP- Material uniforme	
		Calculado	Dif con experimental
150x150	14.5	25.91	11.4
150x100	14.5	NO ROMPE	-

Tabla 3. Tiempo de aparición de fisura- Análisis CDP con material uniforme

Anillos	Tiempo de aparición de la primera fisura [días]		
	Ensayos	Análisis CDP- Material aleatorio	
		Calculado	Dif con experimental
150x150	14.5	13.7	-0.8
150x100	14.5	14.6	0.1

Tabla 4. Tiempo de aparición de fisura- Análisis CDP con material aleatorio

Patrones de fisuración

Utilizando un modelo lineal no es posible obtener los patrones de fisuración en los anillos de hormigón. Por otro lado al emplear anillos circulares no es posible predecir la ubicación de las fisuras por la simetría que presenta dicha geometría, como puede observarse en la Figura 5.



Figura 5. Patrones de fisuración anillos circulares. Ensayos [3] (izq.) - Modelo (der.)

Por este motivo resulta de interés la utilización de anillos elípticos, al poseer éstos dos ejes de dimensiones diferentes es posible definir la ubicación de la fisura.

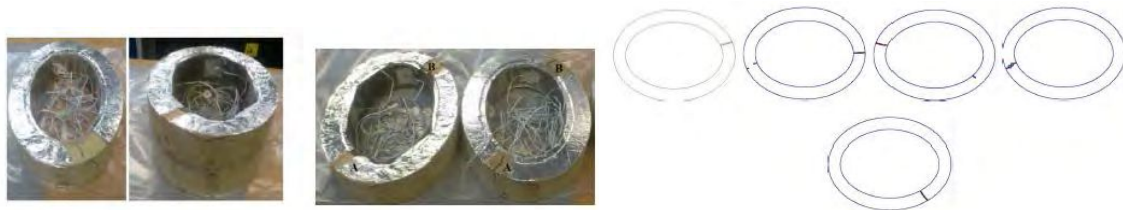


Figura 7. Patrones de fisuración anillos elípticos. Ensayos [3] (izq.) - Modelo (der.)

Como se observa en la Figura 7 (izq.) la ubicación de las fisuras es cercana al diámetro mayor de la elipse, lo cual es captado en las simulaciones, como se observa en la Figura 7 (der).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el algoritmo desarrollado en Matlab por los autores que permite considerar la aleatoriedad presente en las propiedades mecánicas del hormigón. Para validar su aplicación, las salidas del algoritmo se aplicaron al modelo “Concrete Damaged Palasticity”, disponible en Abaqus/Standard, como datos de entrada para la simulación del ensayo ASTM C1581. Los resultados obtenidos muestran que se pudo predecir el tiempo y lugar de aparición de las fisuras con un error aceptable en anillos inicialmente intactos, en relación a los resultados experimentales disponibles en la bibliografía [2] y a los obtenidos con un modelo lineal y aplicando CDP con propiedades uniformes.

La asignación de propiedades aleatorias a la estructura permite otorgarle un enfoque más realista al análisis. A su vez, la generación de distintos patrones de fisuración para una misma geometría permite realizar un análisis estadístico del tiempo de aparición de fisuras a partir del análisis numérico.

REFERENCIAS

- [1] P. Kumar Metha, Paulo J. M. Monteiro. Concreto, estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. 1998
- [2] W. Dong, X. Zhou, Z. Wu, G. Kastiukas. Effects of specimen size of shrinkage cracking of concrete via elliptical rings: Thin vs. thick. *Computer and Structures*, vol 174, pp. 66-78, 2016
- [3] ASTM C 1581/C 1581M-09, Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage. ASTM International, pp. 1-7, 2009.
- [4] Dassault Systèmes Simulia Corp.: ABAQUS. User's Manual Version 6.13 (2013) Vol. 3, pp 437-465.
- [5] ASTM, C341/C341M-13. Standard practice for preparation and conditioning of cast, drilled, or sawed specimens of hydraulic-cement mortar and concrete used for length change measurements. ASTM International, pp 1-4, 2013.
- [6] J. H. Moon, F. Rajabipour, B. Pease, J. Weiss. Quantifying the influence of the restrained ring test. *Journal of ASTM International*. Vol 3 (5), pp. 1-13, 2006.
- [7] Z. P. Bazant, J. Planas. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials. CRC Press, 1998