



SIMULACIÓN DEL DAÑO EN CONCRETOS JÓVENES, EN SU PROCESO DE ENDURECIMIENTO, MEDIANTE MODELOS DE DAÑO CONTINUO

Jaime Retama Velasco¹, Gelacio Juárez Luna² y A. Gustavo Ayala Milián³

RESUMEN

En este artículo se presenta un estudio del problema de agrietamiento en concreto debido a deformaciones térmicas. Se utiliza una formulación para el análisis de esfuerzos que simula el daño experimentado por estructuras masivas de concreto ante condiciones termo—mecánicas. El modelo se basa en la mecánica del daño en el que las variables internas dependen de la temperatura y de la edad del concreto. El modelo se implementa en un programa de computadora de elementos finitos; considerando un comportamiento cuasi—estático. Las propiedades de los concretos a diferentes edades se obtienen a partir de resultados experimentales reportados por otros investigadores. Para validar la consistencia teórica y numérica de la formulación, se presenta un ejemplo de aplicación.

ABSTRACT

The problem of cracking induced by thermal deformations is addressed in this paper. The formulation adopted for the evaluation of the stress state, considers the damage undergone by massive concrete structures under thermo—mechanical conditions. The continuum damage model considers different internal variables which depend of temperature and concrete age. The model is implemented numerically in a computer program based in the Finite Element Method; considering a quasi—static behavior. Properties of young concrete, for different ages, are adopted from experimental results, reported by other researches. At the end of the paper, a numerical example is presented to validate the theoretical and numerical consistency of the formulation.

INTRODUCCIÓN

Los procesos químicos que ocurren durante la etapa de endurecimiento en los concretos jóvenes, en los primeros días después de ser colados, están acompañados por cambios de volumen y temperatura que pueden afectar su comportamiento a corto y largo plazo. Inicialmente, durante la generación de calor, y mientras la rigidez de la masa de concreto es baja, se presentan esfuerzos moderados principalmente de compresión; originados por la expansión volumétrica del concreto, figura 1. En una segunda fase, la masa de concreto empieza a enfriarse y, debido a que su rigidez se ha incrementado significativamente, se pueden desarrollar esfuerzos de tensión que deben ser evaluados para evitar problemas de agrietamiento. Si no se toman medidas adecuadas para disipar el calor en la masa de concreto, reduciendo los esfuerzos, se pueden presentar escenarios de daño en los que la capacidad de operación de las estructuras se vea disminuida e incluso, su colapso antes de que estas sean puestas en funcionamiento (Retama y Ayala, 2012), (De Borst y De Boogaard, 1994).

Se ha observado (Ayala *et al.*, 1994) que el incremento de la temperatura en la masa de concreto, durante el proceso de fraguado, depende de diferentes factores:

1. Las dimensiones y geometría de la estructura.
2. Las propiedades térmicas del concreto tales como: calor de hidratación, calor específico, conductividad térmica.
3. Las condiciones en las que se coloca el concreto, como son: temperatura de colado, método de enfriamiento, proceso constructivo.
4. Las condiciones ambientales de: temperatura ambiente, temperatura de las estructuras adyacentes o de sus apoyos, radiación solar.

¹ Investigador honorista, Mecánica Aplicada, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, México, D.F., CP. 04510, Tel: (55)5623-3600, ext. 8352; jretamav@iingen.unam.mx

² Profesor-Investigador, Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, San Pablo Núm. 180, Col. Azcapotzalco, 02200 México, D.F., Tel: (55) 53189455, gjl@correo.azc.uam.mx.

³ Investigador, Mecánica Aplicada, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, México, D.F., CP. 04510, Tel: (55)5623-3658; gayalam@iingen.unam.mx

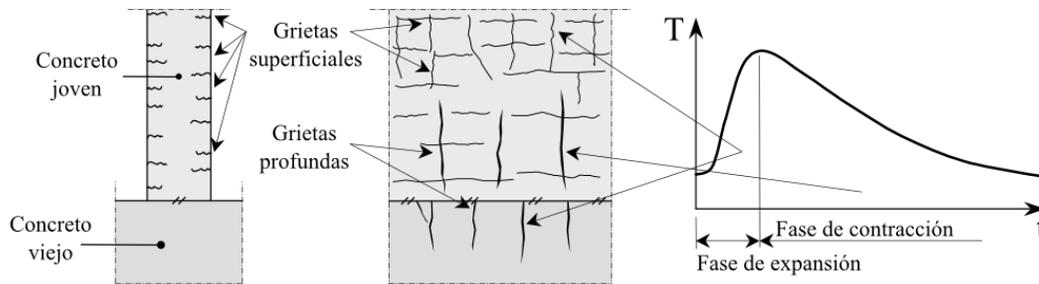


Figura 1 Agrietamiento en concretos jóvenes

De estos factores se ha encontrado que la diferencia de temperaturas entre una masa de concreto joven y las estructuras vecinas y apoyos, influyen en el proceso de generación y disminución de la temperatura en la fase de enfriamiento y subsecuentemente en el potencial de contracción del concreto en proceso de endurecimiento (Holladay, 1987), (COMMISSION 42—CEA, 1981).

El daño inducido en las estructuras en estas edades del concreto, afectará de forma predominante el comportamiento estructural y su capacidad de servicio; favoreciendo la corrosión del refuerzo, carbonatación, y otros procesos químicos que afectan al concreto (De Borst y De Boogaard, 1994).

Para minimizar los daños inducidos a la estructura, como consecuencia del agrietamiento del concreto en edades tempranas, es necesario conocer el mecanismo que se genera durante su proceso de fraguado; consecuencia de la generación de calor por la hidratación del cemento. Igualmente importante es establecer acciones que permitan la liberación del calor generado en la masa de concreto, tales como:

1. Agregar aditivos para incluir aire
2. Utilizar cementos con bajo calor de hidratación y con cenizas
3. Reducir el contenido de cemento
4. Reducir el revenimiento del concreto
5. Colocar serpentines de enfriamiento
6. Aplicar procedimientos constructivos que permitan el enfriamiento del concreto

Para lograr entender y minimizar los efectos del calor en la masa de concreto, es necesario llevar a cabo investigaciones que combinen la parte experimental y la simulación numérica y computacional. En lo que se refiere a la parte experimental, existe una gran cantidad de reportes de investigación sobre el tema de concretos jóvenes (Van De Bogert *et al.*, 1987), (Kim *et al.*, 2004), (Schutter y Taerwe, 1997), (Jin y Li, 2000). Otros trabajos de investigación se han enfocado en la parte de simulación numérica del proceso de agrietamiento, producto de la liberación de calor de hidratación generado en la masa de concreto (Retama y Ayala, 2012), (De Borst y De Boogaard, 1994), (Ayala *et al.*, 1994), (Schutter, 2002), (Nagy, 1997), (Lee y Kim, 2009).

En este artículo se estudia el problema de agrietamiento en los concretos jóvenes, consecuencia del calor inducido a la masa de concreto por la hidratación del cemento, mediante un modelo de daño continuo y el método de los elementos finitos, en su aproximación de desplazamientos. Las propiedades mecánicas del material se obtuvieron a partir de experimentos de laboratorio, reportados por otros investigadores.

La evolución de los esfuerzos y el agrietamiento, dentro de la masa de concreto, es básicamente un problema termodinámico acoplado. Para fines de una aproximación, se considera un proceso desacoplado. Primeramente se resuelve el problema térmico. Los resultados de este análisis sirven como datos de entrada para el posterior análisis mecánico en el que se determina el estado de esfuerzos y el agrietamiento.

MODELO DE DAÑO CONTINUO ISÓTROPICO

El objetivo fundamental de una ley constitutiva de daño continuo es establecer un modelo, dentro del contexto de la mecánica del medio continuo, que permita caracterizar, representar y modelar, en una escala macroscópica, el efecto

de las imperfecciones que se encuentran distribuidas en el material, y su coalescencia a lo largo de la historia de carga monótona aplicada a la estructura, figura 2.

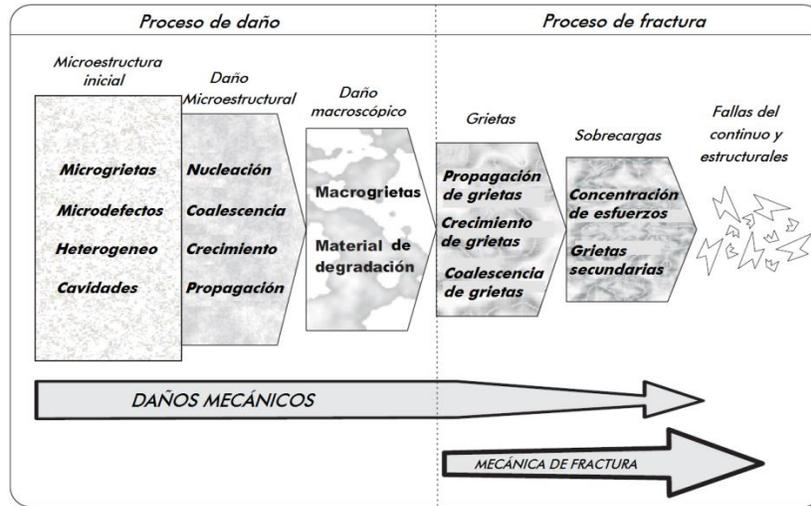


Figura 2 Daño en un sólido inicialmente continuo

El daño en el material se puede presentar de diferentes maneras, dependiendo de su naturaleza. Para el concreto, los defectos aparecen como consecuencia de la pérdida de adherencia entre el aglutinante y el agregado; provocando micro-grietas distribuidas relativamente uniformes, por lo menos en la etapa inicial de carga.

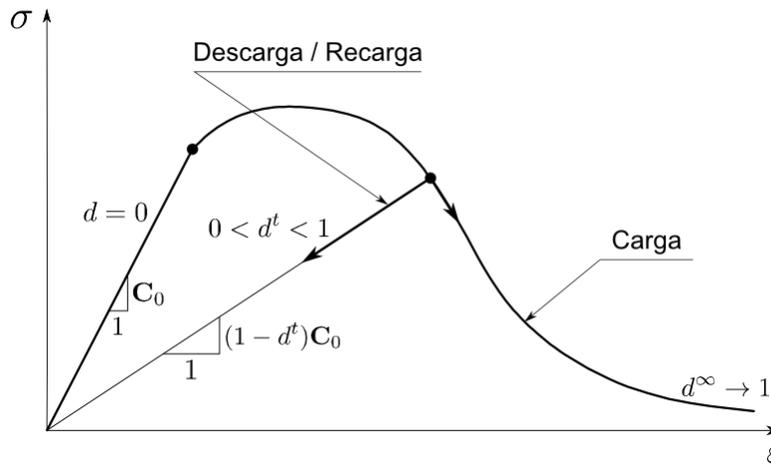


Figura 3 Modelo de daño isotrópico

El modelo de daño continuo que se utiliza en este artículo, corresponde al presentado por Oliver y colaboradores (Oliver *et al.*, 1990). En este modelo se considera que el material experimenta ablandamiento por deformación, como se observa en la figura 3. La ecuación constitutiva para daño isotrópico está dada por

$$\sigma = (1 - d)C_0\varepsilon \tag{1}$$

donde σ y ε son los tensores de esfuerzo y deformación, respectivamente; d es la variable escalar de daño y C_0 es el tensor constitutivo elástico del material, sin daño. Se puede derivar la ecuación (1) de la definición de la densidad de energía libre de Helmholtz Ψ dada como

$$\Psi(\varepsilon, d(r)) = (1 - d)\Psi_0 = \frac{1}{2}(1 - d(r))\varepsilon C_0\varepsilon \tag{2}$$

en la que Ψ_0 es la densidad de energía libre elástica. El parámetro d solo puede incrementarse desde un valor de 0, estado sin daño, hasta 1, que corresponde a un estado completamente dañado y que depende de la variable escalar interna r que considera el estado de deformación en el sólido.

Para cualquier proceso termodinámicamente estable, la ecuación (2) debe satisfacer la siguiente desigualdad de Clausius-Duhem

$$\mathcal{D} = -\dot{\Psi} + \sigma \dot{\epsilon} \geq 0 \quad (3)$$

En la ecuación (3), el punto, $(\dot{\bullet})$, significa derivada temporal de la variable indicada. El modelo constitutivo definido por las ecuaciones (1-3) queda completamente descrito mediante:

- Energía libre de Helmholtz

$$\Psi(\epsilon, d(r)) = (1 - d)\Psi_0 \quad (4a)$$

- Ecuación constitutiva

$$\sigma = (1 - d)\mathbf{C}_0\epsilon \quad (4b)$$

- Variable de daño

$$d(r) = 1 - \frac{q}{r}; \quad q \in [r_0, 0] \quad (4c)$$

- Ley de evolución

$$\dot{r} = \lambda \begin{cases} r \in [r_0, \infty] \\ r_0 = r|_{t=0} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{E}} \end{cases} \quad (4d)$$

- Función de fluencia

$$f(\tau_\sigma, q) = \tau_\sigma - q; \quad \begin{cases} q \in [0, r_0] \\ q|_{t=0} = r_0 \end{cases} \quad (4e)$$

- Condiciones de carga-descarga

$$\dot{\lambda} \geq 0; \quad f \leq 0; \quad \dot{\lambda}f = 0; \quad \lambda \dot{f} = 0; \quad \dot{\lambda} \dot{f} = 0 \quad (4f)$$

donde la variable de daño d se define en términos de la variable de endurecimiento/ablandamiento q , la cual es dependiente del parámetro de endurecimiento/ablandamiento H . El multiplicador de daño λ determina las condiciones de carga-descarga, la función $f(\tau_\sigma, q)$ delimita el dominio elástico que define la superficie de daño en el espacio de los esfuerzos. El valor r_0 es el valor umbral que limita el dominio elástico inicial. Para una descripción detallada del modelo, se refiere al lector al trabajo de Retama (Retama, 2010).

EJEMPLO NUMÉRICO

Para mostrar la aplicación del modelo de daño y la influencia de la edad de fraguado en el comportamiento mecánico de los concretos jóvenes, a continuación se presenta un ejemplo numérico en el que se utilizan elementos finitos planos de deformación constante para la discretización del dominio (Zienkiewicz *et al.*, 2005), (Bathe, 1996).

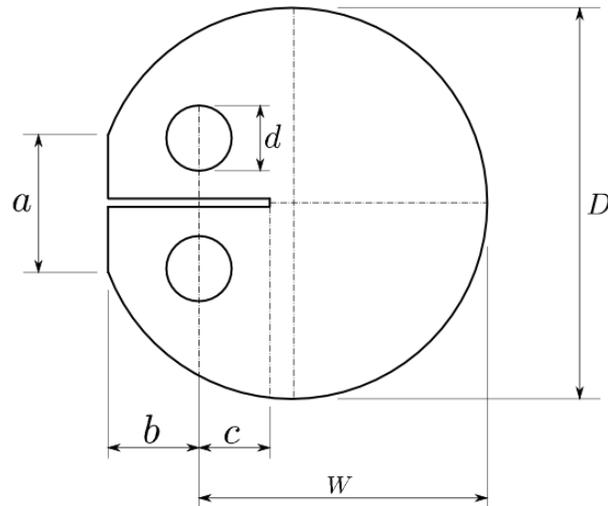


Figura 4 Geometría del problema

GEOMETRÍA

El ejemplo numérico que se presenta, corresponde a la geometría de una probeta estandarizada por la ASTM (acrónimo de su nombre en inglés, *American Society for Testing and Materials*), (ASTM D7313-13), para obtener la energía de fractura de un concreto asfáltico. Se adoptó esta geometría debido a que el objetivo principal del ejemplo numérico es el de mostrar la influencia de la edad del concreto en su comportamiento mecánico, especialmente en su evolución al colapso. En la figura 4 se muestra la geometría del problema en la que los parámetros indicados tienen los siguientes valores:

- $D = 150 \text{ mm}$
- $d = 25 \text{ mm}$
- $a = 50 \text{ mm}$
- $b = 35 \text{ mm}$
- $c = 27.50 \text{ mm}$
- $W = 110 \text{ mm}$
- espesor = 50 mm

Como se puede observar en la geometría del problema, figura 4, existe una muesca al centro, de forma simétrica respecto al eje horizontal. Este hecho garantiza que, al realizar el experimento de laboratorio, el daño se concentre en la punta y que la grieta se propague desde este punto hasta la parte opuesta, horizontalmente, a éste. Además, se garantiza de que la zona de plastificación alrededor de la muesca sea mínima; en comparación con las dimensiones del espécimen.

PROPIEDADES DEL MATERIAL

En lo que se refiere a las propiedades mecánicas de los concretos a diferentes edades, estas se obtuvieron del trabajo de investigación por parte de Kim y colaboradores (Kim *et al.*, 2004). A continuación se muestra en la tabla 1 las propiedades mecánicas para los concretos a diferentes edades:

Tabla 1 Propiedades mecánicas del concreto a diferentes edades

Edad (días)	Resistencia $f'c$ (MPa)	Esfuerzo último σ_u (MPa)	Módulo Elástico E_c (MPa)	Energía de Fractura G_f (N/m)
1.5	5.49	1.56	12,945	83.93
3.5	16.48	2.23	22,948	142.38
7.75	22.36	3.27	26,184	106.80
14.75	26.58	3.70	26,870	104.65
28.5	33.24	3.92	28,832	127.74

Es importante hacer énfasis que, de lo observado en la tabla 1, la energía de fractura para a un concreto con 3.5 días de edad es mayor que la correspondiente a todos los otros casos. Este valor está acorde a lo reportado por Kim.

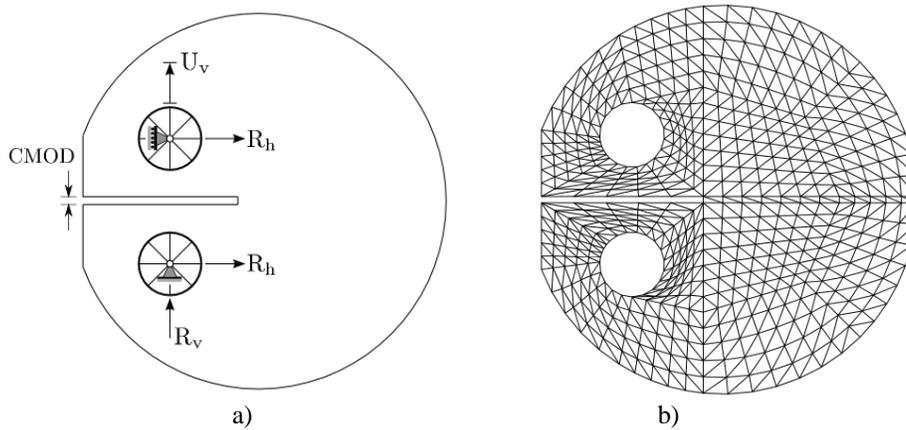


Figura 5 Modelado numérico del problema a) Condiciones de frontera y b) Malla de elementos finitos

MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Para realizar el análisis numérico, se utilizó un modelo de elementos finitos, en dos dimensiones, para discretizar el dominio. Los elementos utilizados fueron elementos triangulares de deformación constante, como se muestra en la malla de la figura 5b. Conjuntamente con este tipo de elemento finito, se consideró la teoría de pequeñas deformaciones en la que se asume un estado de deformaciones planas. Se justifica esta aproximación debido a que el espesor es del orden de la mitad de la dimensión más grande D .

En lo que se refiere a las condiciones de frontera, apoyos, se utilizó un apoyo fijo que restringe el movimiento en las dos direcciones, nodo inferior de la figura 5a, y otro que solo restringiera el movimiento horizontal, nodo superior de la figura 5a. Como se puede observar en la figura 5a, para simular de forma más realista el efecto que le transmiten los pernos de carga de la máquina experimental al espécimen, se utilizaron elementos barra que solo trabajan a compresión. En el momento en que estos elementos experimentan tensión se desactivan; es decir su rigidez se reduce a cero. Esta condición de apoyo da resultados muy próximos a los correspondientes a pruebas de laboratorio, como lo muestra Geers en su tesis de Doctorado (Geers, 1997). Para llevar al espécimen hasta la falla total, se utilizó un control de desplazamientos en el nodo superior de la figura 5a.

En el modelo de daño utilizado, se consideró que la falla ocurre de forma dominante en Modo I, y que la fluencia del material empieza cuando el esfuerzo principal máximo σ_I sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material σ_u ; similar al criterio de falla de Rankine en teoría de plasticidad clásica.

RESULTADOS

El análisis numérico se realizó en el programa de computadora de elementos finitos FEAP (acrónimo de su nombre en inglés, *Finite Element Analysis Program*); desarrollado en Berkeley por el Profesor Taylor (Taylor, 2013). Se utilizó un control de desplazamientos, de forma monótona creciente, hasta alcanzar la falla total del espécimen.

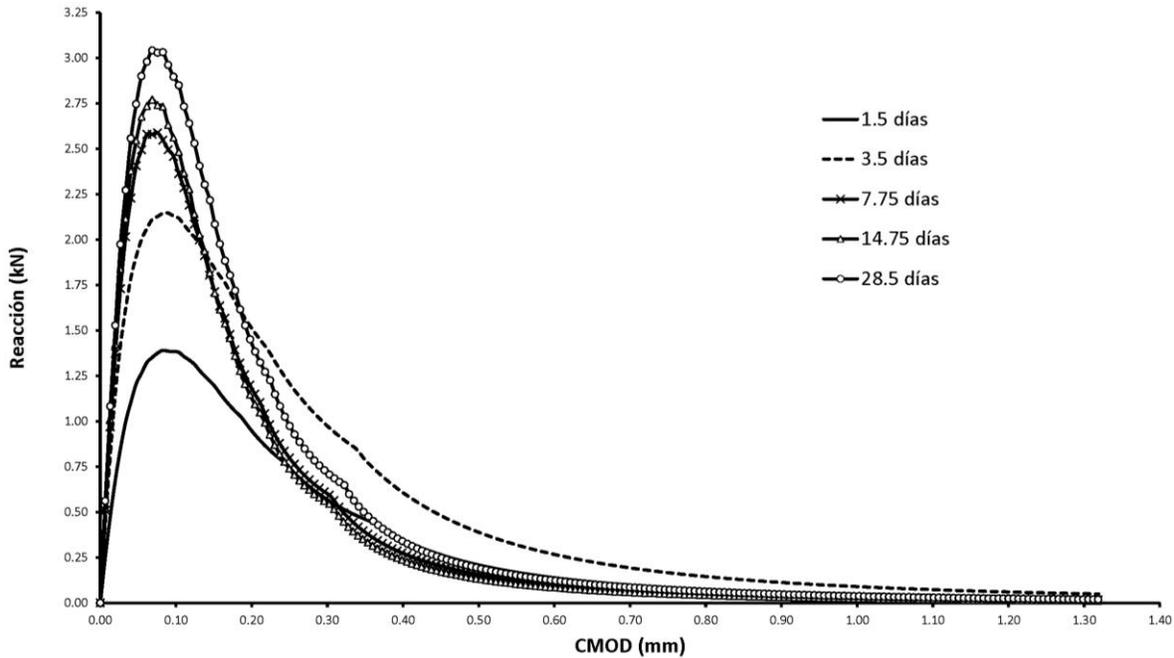


Figura 6 Curvas Reacción-CMOD para diferentes edades del concreto

Los resultados obtenidos de la modelación numérica, se muestran en la gráfica de la figura 6. En el eje horizontal se tienen los valores correspondientes al CMOD (acrónimo de su nombre en inglés, *Crack Mouth Opening Displacement*) que es la apertura en la muesca, como se muestra en la figura 5a. En el eje vertical se grafican los valores de la reacción vertical en el nodo inferior. De estas gráficas se observa que la edad del concreto influye en su ductilidad; es decir, su comportamiento dúctil se reduce a medida que su edad se incrementa. Este hecho concuerda con el comportamiento físico de los concretos. A mayor edad del concreto, su revenimiento disminuye y su resistencia aumenta. Este comportamiento se ve reflejado en las gráficas de la figura 6 en las que la pendiente de la rama ascendente aumenta con la edad. Este mismo efecto sucede para la rama descendente; la rama es más prolongada para concretos muy jóvenes y más inclinada para concretos con mayores edades.

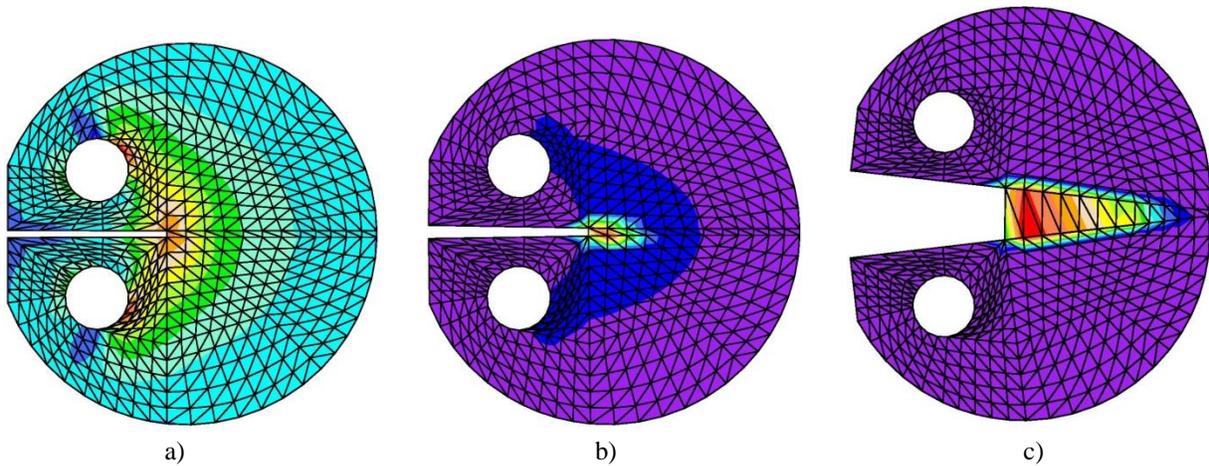


Figura 7 Evolución de los esfuerzos principales máximos

Para hacer notar el daño que experimenta el espécimen a medida que se aplican desplazamientos monótonos, en la figura 7 se muestran diferentes estados de esfuerzos, esfuerzos principales, a medida que la grieta se propaga desde la punta de la muesca hasta el punto opuesto a ella, horizontalmente. Es importante observar que una vez que la grieta se ha propagado por completo, figura 7c, el espécimen queda dividido en dos partes; experimentando una descarga elástica, *i.e.*, los esfuerzos regresan a cero.

CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una modelación numérica del problema de daño en concretos jóvenes para diferentes edades de fraguado; utilizando un modelo de daño continuo. Como una primera aproximación al problema, termo-mecánico, en este trabajo solo se estudió el efecto de la edad del concreto en su comportamiento ante cargas monótonas. Sin embargo, para futuros desarrollos es importante refinar el modelado mediante la consideración del calor de hidratación del cemento y su influencia en el agrietamiento de las masas de concreto. De este estudio se concluyen lo siguiente:

- La edad del concreto influye de manera directa en su ductilidad. A mayor edad, la pendiente de la curva descendente aumenta.
- A pesar de no considerar el efecto de los esfuerzos térmicos en el análisis, se observa que a menor edad existe un mayor riesgo de que se presente agrietamiento prematuro en las masas de concreto.
- Es necesario contar con resultados experimentales que muestren no solo la influencia de la edad del concreto en su comportamiento; sino también el efecto que tiene el calor de hidratación del cemento que genera esfuerzos térmicos que deben ser considerados.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo fue posible gracias al apoyo otorgado el proyecto, PAPIIT IN108512, “Simulación numérica del proceso de falla en elementos de concreto reforzado considerando el efecto del calor de hidratación del cemento en los concretos jóvenes” por parte de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México. De igual forma, el primer autor agradece al Instituto de Ingeniería de la UNAM por la beca recibida para realizar una estancia de posdoctorado en la Coordinación de Mecánica Aplicada de este Instituto.

REFERENCIAS

Retama J., y Ayala A.G. (2012), “**Simulation of the heat hydration and the hardening process of massive concrete structures, through continuum damage model**”, 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM 2012), Sao Paulo, Brazil.

Retama J. (2010), “**Formulation and approximation to problems in solids by embedded discontinuity models**”, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México.

Ayala A.G., Ramírez O., y García O. (1994), “**Análisis y evaluación estructural de la cortina del proyecto hidroeléctrico de Zimapán**”, Reporte técnico 4554, Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, D.F.

Nagy A. (1997), “**Simulation of the thermal stress in reinforced concrete at early ages with a simplified model**”, *Materials and Structures*, vol. 30, pp. 167-173.

De Borst R., y Van De Boogaard A.H. (1994), “**Finite-element modeling of deformation and cracking in early-age concrete**”, *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 120, núm. 12, pp. 2519-2534.

Holladay N.C. (1987), “**Concrete temperature control during Dam construction**”, *Water Power & Dam Construction*, vol. 39, núm. 5, pp. 17-20.

COMMISSION 42—CEA. (1981), “**Properties of set concrete at early ages state-of-the-art-report**”, *Materials and Structures*, vol. 14, núm. 6, pp. 399-450.

Van Den Bogert P.A.J., De Borst R., y Nauta P. (1987), “**Simulation of the mechanical behavior of young concrete**”, *IAPSE Rep.*, vol. 54, pp. 339-347.

Kim J.K., Lee Y., y Yi S.T. (2004), “**Fracture characteristics of concrete at early ages**”, *Cement and Concrete Research*, vol 34, pp. 507-519.



Schutter G.D., y Taerwe L. (1997), **“Fracture energy of concrete at early ages”**, Materials and Structures, vol. 30, pp. 67-71.

Jin X., y Li Z. (2000), **“Investigation on mechanical properties of young concrete”**, Materials and Structures, vol. 33, pp. 627-633.

Schutter G.D. (2002), **“Finite element simulation of the thermal cracking in massive hardening concrete elements using degree of hydration based materials laws”**, Computers and Structures, vol. 80, pp. 2035-2042.

Lee Y., y Kim J.K. (2009), **“Numerical analysis of the early age behavior of concrete structures with a hydration based microplane model”**, Computers and Structures, vol. 87, pp. 1085-1101.

Oliver J., Cervera M., Oller S., y Lubliner J. (1990), **“Isotropic damage models and smeared crack analysis of concrete**, Proc. SCI-C Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, pp. 945-957.

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., y Zhu J.Z. (2005), **“The finite element method: Its basis and fundamentals”**, Butterworth-Heinemann, Oxford.

Bathe K.J. (1996), **“Finite element procedures”**, Prentice-Hall, New Jersey.

American Society for Testing and Materials (ASTM), **“Standard test method for determining fracture energy of asphalt-aggregate mixtures using the disk-shape compact tension geometry”**, D7313-13.

Geers M.G.D. (1997), **“Experimental analysis and computational modelling of damage and fracture”**, Tesis de Doctorado, Eindhoven University of Technology, The Netherlands.

Taylor R.L. (2013), **“FEAP: A Finite Element Analysis Program”**, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.