

SOBRE ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN EN HORMIGONES A EDAD TEMPRANA

Marcia Rizo Patrón

*Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Av. Belgrano (S) N° 1912, 4200 Santiago del Estero, Argentina*

Guillermo Etse

*Departamento de Construcciones y Obras Civiles – Universidad Nacional de Tucumán
Av. Roca 1800, CC 134, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina*

RESUMEN

De especial interés para el análisis estructural es la evaluación y predicción de las formas de falla, dúctil o frágil, que gobiernan la respuesta de materiales ingenieriles cuando son excitados más allá del límite elástico. De la teoría de propagación de ondas se deduce un indicador de falla localizada, el determinante del tensor acústico o de localización, que permite determinar no solamente el tipo de falla que acontece, sino también las direcciones críticas de fractura.

En el caso especial del hormigón en edades tempranas, las predicciones del modo de falla revisten particular interés debido al importante cambio de las propiedades mecánicas que se registran durante el proceso de hidratación y fraguado.

En este trabajo se analizan los indicadores de falla en un modelo termo-químico-elastoplástico, el cual tiene en cuenta la dependencia de los parámetros mecánicos fundamentales del hormigón en el grado de hidratación, a fin de reproducir el campo de deformaciones que se desarrolla en edades tempranas del material. Se estudia la variación de las propiedades de localización, en particular el ángulo crítico de fractura, mediante ensayos de elementos finitos en historias de carga de compresión.

ABSTRACT

Evaluation and prediction of the kind of failure, ductile or brittle, that governs the engineering material response when they are excited beyond the elastic limit has a special interest for the structural analysis. A local failure indicator is deduced from the wave propagation theory; the determinant of the acoustic tensor, which allows to find the kind of failure and its critical directions.

In the special case of concrete at early ages, the failure depends on the mechanical properties of concrete, which change during the hydration process.

In this paper we analyze the failure indicators in a thermo-chemical-elastoplastic model, which accounts the dependency of the fundamental mechanical parameters of concrete on the degree of hydration in order to reproduce the deformation field that develops at early ages of the material. In this sense we study the evolution of localization properties, in particular the critical directions of failure by means of finite element analysis of compression tests.

INTRODUCCIÓN

Los hormigones, sin distinción de clases, son medios porosos en los cuales se desarrollan reacciones químicas a escalas mucho más reducidas que el nivel macro en que usualmente se describen los materiales ingenieriles. Dichas reacciones pueden inducir deformaciones inelásticas, microfisuras y fracturas, las cuales afectan considerablemente las propiedades de rigidez y de resistencia del material. Ellas involucran complejos mecanismos físico-químicos que intervienen en un espectro de escalas bastante amplio, desde nanómetros a metros.

Es sabido que las estructuras de hormigón masivo se fisuran como consecuencia del efecto de la temperatura y de la contracción por fraguado, particularmente en edades tempranas del material. La baja conductividad del material y el fenómeno de convección con el medio ambiente pueden generar gradientes térmicos considerables. En muchos casos estos procesos termo-químicos que se llevan a cabo en el hormigón pueden conducir a un deterioro irreversible del sistema estructural del que forma parte el material y a consecuencias negativas para la durabilidad del mismo.

En este contexto, el análisis de las propiedades de localización, durante el proceso de hidratación del hormigón, permite evaluar la respuesta de falla de estructuras sometidas a diversas historias de carga a edades tempranas.

MODELO TERMOQUÍMICO-ELASTOPLÁSTICO PARA HORMIGÓN

A fin de modelar numéricamente el comportamiento del hormigón en edades tempranas se emplea en este trabajo un criterio plástico de superficie única definido por la función de discontinuidad de Drucker-Prager. Este criterio describe la superficie de máxima resistencia en términos del primer invariante del tensor de tensiones (presión media) y del segundo invariante del tensor desviador de tensiones. La función de fluencia basada en la elastoplasticidad clásica de Drucker-Prager ha sido extendida a fin de considerar el acoplamiento termoquímico debido a la hidratación del hormigón durante el proceso de envejecimiento (ver [4]).

$$\sigma \in C_E \Leftrightarrow F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k_0 + \alpha/3 \zeta(\chi, r) \quad (1)$$

con $\zeta(\chi, r)$: fuerza de endurecimiento

r : grado de hidratación.

χ : vector de variables internas relacionadas con el comportamiento irreversible del material.

La fuerza de endurecimiento puede ser desacoplada aditivamente en dos términos

$$\zeta(\chi, r) = -r(k_\infty - k_0) - r \frac{\partial U_\infty(\chi)}{\partial \chi} \quad (2)$$

con k_∞ : presión de cohesión en hidratación completa

$U_\infty(\chi)$: energía congelada (*frozen energy*) para $t \rightarrow \infty$.

El primer término de la (2) representa el endurecimiento-ablandamiento plástico, mientras que el segundo representa el incremento de rigidez debido al endurecimiento químico, descrito en términos del grado de hidratación.

Se adopta:

$$\chi = \varepsilon_p = tr \varepsilon_p \quad (3)$$

y

$$\frac{\partial U_\infty(\chi)}{\partial \chi} = \frac{\partial U_\infty(\varepsilon_p)}{\partial \varepsilon_p} = \Omega \varepsilon_p \quad (4)$$

Reemplazando la (4) en la (2) se obtiene

$$\zeta(\chi, r) = -r(k_\infty - k_0) - r\Omega \varepsilon_p \quad (5)$$

donde Ω es una constante.

ANÁLISIS DE LOCALIZACIÓN

Con bastante antelación al colapso de un sistema estructural, los materiales constitutivos son sometidos a deformaciones que sobrepasan su rango de respuesta lineal. En la mayoría de los casos estas deformaciones activan el régimen de pospico o de ablandamiento, el cual da lugar a procesos de concentración de tensiones.

Si se acepta que la falla estructural es una consecuencia de la falla material, se deduce entonces la importancia de analizar detalladamente los diferentes diagnósticos conocidos de falla a nivel constitutivo. Entre los indicadores de falla se destacan aquí, el indicador de estado límite, el indicador de inestabilidad material y la condición de bifurcación discontinua del equilibrio, la cual es conocida como el indicador de falla material localizada.

Clasificación de falla material

El comportamiento de falla del material puede estar caracterizado por distribuciones continuas o discontinuas del campo de deformaciones.

Cuando el proceso de falla no altera las condiciones de compatibilidad cinemática del continuo, es decir que no se producen discontinuidades espaciales, se habla de *falla continua o difusa*. A nivel estructural, este tipo de falla resulta en una gradual degradación de la resistencia.

En el caso de formación de discontinuidades espaciales débiles, se trata de *falla localizada*. Se caracteriza por la presencia de las llamadas bandas de corte de espesor finito, a lo largo de una superficie de discontinuidad, la cual se presenta en el campo de las tasas de deformaciones, llamadas también gradiente de velocidades. Por esta razón, se la denomina superficie de discontinuidad de primer orden.

En el caso de *falla discreta*, se producen degradaciones superiores de las relaciones de compatibilidad cinemática, introduciendo saltos que no solamente afectan las deformaciones, sino también los campos de desplazamientos. Se habla, en este caso, de superficies de discontinuidad de orden cero.

El modo de falla localizada se manifiesta en una repentina reducción de la resistencia a nivel estructural, acompañada por la formación de discontinuidades espaciales en forma de fisuras por tracción y bandas de corte.

Indicadores de falla

La falla difusa o continua está asociada con la singularidad de la rigidez material tangente. Esta condición infiere una bifurcación material, es decir la singularidad del operador material tangente y conduce a un estado límite cuando se activa una dirección crítica asociada a un autovalor. Por otro lado, la falla localizada corresponde a un estado de bifurcación dentro del material, el cual está asociado con discontinuidades espaciales de las variables de campo.

Indicador de falla localizada

La condición de localización de falla corresponde a la singularidad del llamado tensor de localización:

$$\det(Q_{ep}) = N \cdot E_{ep} \cdot N = 0 \quad (6)$$

donde N denota la dirección de propagación de onda o el plano normal a la superficie de discontinuidad.

Del análisis de propagación de ondas en sólidos surge que la condición (6) es sinónimo de la pérdida de positividad de la velocidad de propagación c_i^2 , es decir:

$$\rho c_i^2 = d^2 W_{loc} = M \cdot Q_{ep} \cdot M = (M \otimes N) : E_{ep} : (M \otimes N) = 0 \quad (7)$$

donde ρ denota la densidad de masa. De esta ecuación se desprende que los valores nulos de la velocidad de propagación pueden ser a su vez interpretados como la condición de trabajo mecánico nulo para la formación de la discontinuidad. Por ser la (7) una forma cuadrática de la (6), se deduce que la pérdida de positividad de la velocidad de propagación es una condición necesaria pero no suficiente para la localización de deformaciones.

ANÁLISIS NUMÉRICO

Primeramente se analiza el cambio en las propiedades de localización del hormigón cuando éste es sometido a carga en edad temprana. La figura 1 muestra la geometría y condiciones de borde empleadas en el análisis por el

Método de los Elementos Finitos de un ensayo homogéneo con control de desplazamientos en el que se modeló la probeta con un único elemento isoparamétrico plano Q4.

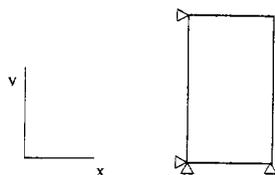


figura 1- Geometría y condiciones de

La respuesta carga-desplazamiento de este ensayo numérico se observa en la figura 2. En ésta se tomaron distintos puntos de la rama de prepico, a fin de considerar estados tensionales y parámetros materiales correspondientes a diferentes estados de hidratación del hormigón. El análisis de las propiedades de localización

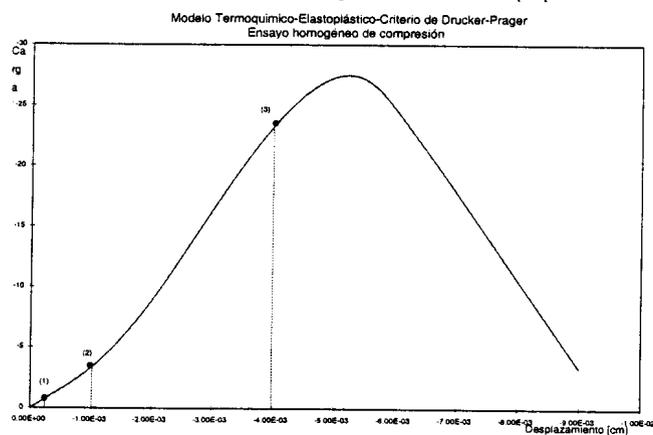


figura 2

se llevó a cabo para dichos estados tensionales, y sus resultados se muestran en la figura 3, en la que se grafica en ordenadas la relación $\det Q_{ep} / \det Q_e$ en función de la dirección de la normal a la superficie de falla.

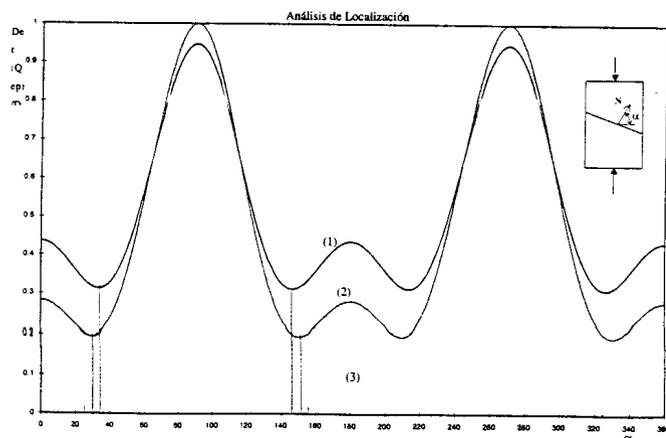


figura 3

Finalmente, para ilustrar la influencia de la variación de las propiedades materiales en la respuesta carga-desplazamiento, se realizó la modelación computacional de una probeta de hormigón que es sometida a carga monotónica de compresión a edad temprana pero empleando una malla de 32 elementos (ver figura 4). Esto permite considerar los diferentes grados de hidratación existentes en el interior de la misma, es decir, los diferentes estados de humedad en que se encuentra el material a medida que se investigan distintos puntos de la probeta. La figura 5 representa la respuesta carga-desplazamiento obtenida en estos ensayos. La curva (1) muestra la respuesta considerando que todos los elementos, tanto los interiores como los exteriores tienen la misma evolución del grado de hidratación, y por lo tanto de sus parámetros materiales. La curva (2) corresponde a una malla en la cual se consideró dos grupos de elementos que se hidrataban a diferentes velocidades, siendo mayor la de los elementos exteriores. Finalmente, en la (3) se consideran cuatro grupos materiales con el mismo criterio anterior. Se observa que a medida que se consideran mayores variaciones en el gradiente de hidratación, la respuesta material tiende a ser más rígida, debido a que los elementos exteriores, que se hidratan más rápidamente, alcanzan antes los valores finales del módulo de elasticidad y resistencia a la compresión.

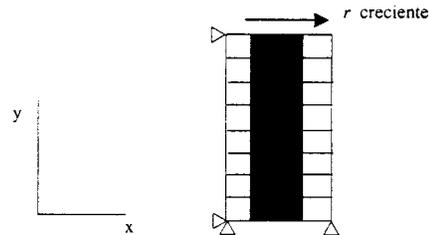


figura 4- Malla de 32 elementos - Modelación de diferentes estados de hidratación

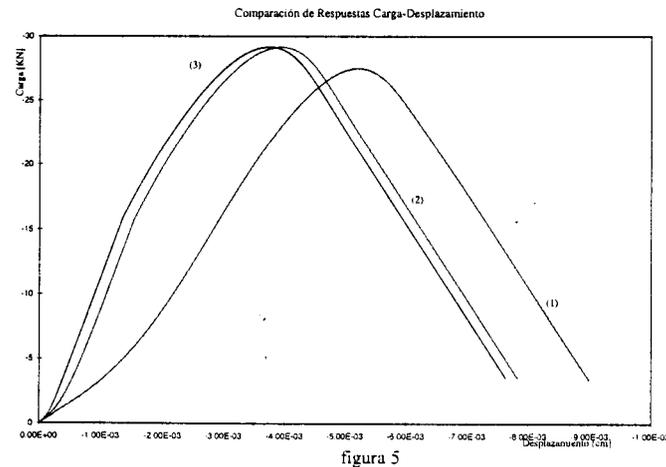


figura 5

CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados precedentes se concluye lo siguiente: las propiedades de localización del hormigón sufren variaciones a medida que sus parámetros mecánicos evolucionan. Esto se traduce a la vez en cambios en las direcciones críticas de falla, como puede apreciarse en las figuras 3.

Del análisis de la figura 5. puede apreciarse que el modelo predice diferentes cargas límite a medida que se consideran distintas discretizaciones, y por consiguiente, diferentes gradientes de hidratación en la probeta.

REFERENCIAS

- [1] Coussy, O. , "Mechanics of porous continua". J. Wiley and Sons, Chichester, U.K. 1996.
- [2] Prato T., Cervera M. y Oliver J., "Simulación numérica del proceso de hidratación del hormigón". Public. CIMNE N°114. Barcelona, España, 1997.
- [3] Prato T., Cervera M. y Oliver J., "Modelo termoquímico de hidratación del hormigón". Mecánica Computacional, Volumen XVIII. Bariloche, 1997.
- [4] Rizo Patrón M. y Etse G., "Un modelo termoquímico-elastoplástico para hormigón". Mecánica Computacional, Mecom 99. Mendoza, 1999.
- [5] Ulm, F.-J. & Coussy, O. , "Modelling of thermo-chemo-mechanical couplings of concrete at early ages". J. Engng. Mech. ASCE, 121. 1995.
- [6] Ulm, F.-J. & Coussy, O. , "Strength growth as chemo-plastic hardening in early age concrete". J. Engng. Mech. ASCE, 122. 1996.
- [7] Ulm, F.-J., Coussy, O. & Hellmich, C., "Chemoplasticity: a review of evidence".
- [8] Etse, G. "Theoretische und numerische Untersuchung zum diffusen und lokalisierten Versagen in Beton", PhD. Thesis, Karlsruhe. Germany, 1992.
- [9] Ottosen, N. y Runesson, K. , "Properties of discontinuous bifurcation solutions in elasto-plasticity". International Journal of Solids and Structures. 1989.