

**MODELACION COMPUTACIONAL MICROESTRUCTURAL
DE LA FRACTURA DEL HORMIGON MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS TIPO JUNTA**

Ricardo Lorefice

Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías
Universidad Nacional de Santiago del Estero, Argentina
e-mail: lorefice@unse.edu.ar

y

Guillermo Etse

Departamento de Construcciones y Obras Civiles
Universidad Nacional de Tucumán
Av. Roca 1800 (4000), S. M. de Tucumán, Argentina. CONICET

ABSTRACT

Modelization and calculus of concrete structures are generally based in assumption of homogeneity and continuity in the internal structure during the load process. These hypothesis are justified by the reduced range of stresses assumed during design and calculation of these structures (plain concrete structures) and by the use of steel reinforcements bars in reinforced concrete structures. Despite these considerations, we know that at microstructural scale, concrete is a very heterogeneous material and its behavior can be strongly nonlinear depending on the load history suffered by the material. In this paper we present a Microstructural Constitutive Model for Concrete based on the Plastic Flow Theory. Discontinuities are modeled using combinations of quadrilateral plane isoparametric elements and interface elements to simulate cracks propagation in the mortar matrix or in aggregates.

RESUMEN

La modelación y cálculo de estructuras de hormigón se basa en general en las hipótesis de homogeneidad y continuidad de su estructura interna durante el proceso de carga. En el diseño y cálculo de estructuras las anteriores hipótesis simplificadoras se justifican en el hecho del reducido rango de cargas de utilización en servicio y en el refuerzo del hormigón mediante las armaduras, en el caso del hormigón armado. A pesar de estas consideraciones, es sabido que el hormigón es un material muy heterogéneo a nivel microestructural, siendo ésta la causa de la gran variación en los rangos de respuesta que pueden esperarse dependiendo de la historia de carga sufrida por el material. En el presente trabajo se presenta un modelo constitutivo microestructural para hormigón basado en la teoría del flujo de la plasticidad. La modelación de las heterogeneidades del material se realiza por medio del método de los elementos finitos mediante la combinación de elementos planos de tres o cuatro nodos y elementos de junta para la discretización de la interfase entre áridos y pasta de cemento o para la simulación de fisuras desarrolladas en el interior de los áridos.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el comportamiento del hormigón ha sido estudiado exhaustivamente. En general, la mayoría de los intentos por describir su comportamiento mediante la formulación de leyes constitutivas se basa en las hipótesis de continuidad y homogeneidad. Esto ha permitido la reproducción de comportamientos más o menos complejos. Sin embargo, es sabido que el material es heterogéneo y que presenta dos fases principales cuyas características reales se manifiestan en mayor o menor medida dependiendo del nivel de análisis que se considere. En el estudio de los materiales cuasifrágiles, las investigaciones pueden encuadrarse principalmente dentro de tres niveles de observación-modelización propuestos por Wittman [1]: micro, meso y macro (ver figura 1).

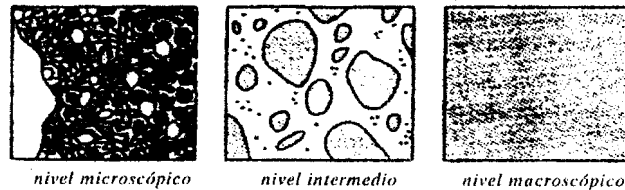


Figura 1: Niveles de análisis (Wittman, 1983)

En la modelación microscópica se representa la estructura interna de la pasta de cemento y de la interfase para simular los diversos fenómenos físico-químicos que tienen lugar a esta escala del material. En el nivel intermedio o mesoestructural, el hormigón se representa como un material compuesto por una matriz porosa que rodea a un conjunto de partículas de diferentes tamaños. La interacción entre ambas fases, de propiedades bien diferenciadas entre sí, se produce a través de una zona de transición constituida por una interfase sin espesor, la cual concentra las debilidades del material compuesto. El nivel macroscópico considera al hormigón como un material continuo y homogéneo. La heterogeneidad del hormigón a nivel mesoescala se debe a su composición de tipo bifásica formada por áridos de tamaño máximo de algunos centímetros embebidos en una matriz de mortero formada por la pasta de cemento, arena y áridos gruesos de menor tamaño. Un aspecto importante de la heterogeneidad del hormigón lo constituye la interfase entre los áridos de mayor tamaño y la matriz, siendo en general ésta interfase la que concentra las zonas de menor resistencia del material.

MODELACION DE LA FISURACIÓN DEL HORMIGÓN

La modelación constitutiva de materiales cuasifrágiles ha seguido, en general, dos líneas teóricas básicas, a saber: la Mecánica de Medios Continuos y la Mecánica de Fractura. La forma tradicional de representar el comportamiento del material, basada en la mecánica de medios continuos consiste en formular leyes tensión-deformación (ecuaciones constitutivas), extendiendo el concepto de deformaciones continuas a la rama de ablandamiento del material independientemente de la aparición de macrofisuras y deformaciones localizadas. El comportamiento observado experimentalmente se interpreta en términos de tensiones y deformaciones promedio en la probeta. En líneas generales, los modelos constitutivos basados en la mecánica de medios continuos pueden dividirse en dos grandes grupos: modelos basados en tensores y sus invariantes y modelos basados en el comportamiento de planos en diversas direcciones. Entre los modelos más sencillos del primer grupo se tienen los modelos elásticos lineales y no lineales y los modelos hipoeásticos. Modelos más elaborados como los basados en la teoría del flujo de la plasticidad combinados

con elasticidad lineal fueron inicialmente formulados para materiales metálicos y posteriormente extendidos para la representación del comportamiento de materiales cuasifrágiles. En estos modelos el comportamiento tensodeformacional se desdobra expresando la deformación total como la suma de una parte elástica recuperable y otra anelástica irre recuperable. La consideración de variables internas cuya evolución depende de las deformaciones plásticas permite obtener comportamientos no lineales (endurecimiento, ablandamiento), considerando la dependencia del camino y la historia de carga. Esta clase de modelos basados en la elastoplasticidad son ampliamente utilizados para predecir el comportamiento del hormigón. Otra teoría muy empleada para la representación del comportamiento de materiales cuasifrágiles es la Teoría del Daño Elástico. Estas formulaciones se caracterizan por un tensor de rigidez secante con 21 componentes independientes con sus respectivas leyes de evolución, Carol [2]. El número de variables puede reducirse mediante el empleo de parámetros de daño de naturaleza escalar, vectorial o tensorial. Las variables de daño simulan a nivel macroscópico la degradación elástica progresiva que sufre el material debido a la propagación e interconexión de microfisuras y poros. Debido a que experimentalmente se ha comprobado que el comportamiento del hormigón involucra tanto fenómenos de localización de deformaciones como degradación de rigidez, se han propuesto algunos modelos que acoplan la teoría elastoplástica y de daño, ver Bazant y Kim [3], Ortiz [4], Simo y Ju [5]. Una modelización muy completa del comportamiento instantáneo y diferido del hormigón se puede lograr mediante la denominada teoría endocrónica. Esta fue propuesta por Valanis para el estudio del comportamiento de metales y adaptada luego por Bazant y Bhat para representar el comportamiento del hormigón. Esta formulación incluye un factor denominado tiempo intrínseco que se expresa en función del tiempo físico y de una variable interna que representa el proceso de deterioro de la microestructura del hormigón. La dificultad de empleo de esta teoría viene dada por su carácter no lineal a nivel incremental. Por último, la limitación de los modelos continuos descritos anteriormente se relaciona con su incapacidad para vincular el estado de daño o deterioro creciente que sufre el hormigón a través del proceso de carga, lo cual se traduce en la rotación de las direcciones de las tensiones y deformaciones principales. En los modelos de microplanos se caracteriza el comportamiento inelástico del material en un plano de orientación genérica (microplano). En este microplano se consideran sólo dos componentes de tensión y deformación, una normal y una tangencial. La relación tensión-deformación a nivel macroscópico se obtiene considerando la contribución de un número finito de microplanos distribuidos de modo de cubrir adecuadamente el espacio. El Principio de los Trabajos Virtuales sirve para relacionar las leyes constitutivas a nivel micro con las leyes constitutivas a nivel macro. Otra forma de representar el proceso de fisuración en materiales cuasifrágiles se logra mediante el empleo de la Teoría de la Mecánica de Fractura. Esta teoría surge a partir de los postulados de Griffith, quien propuso un balance energético para materiales con comportamiento elástico lineal perfectamente frágil. Este criterio postula que la propagación de una fisura tiene lugar cuando la tasa de liberación de energía debida al crecimiento de la fisura es igual o mayor que una tasa crítica de liberación de energía, denominada energía de fractura, G_f , la cual es una propiedad del material. En el marco dado por esta teoría, se han desarrollado diversos modelos para hormigones, a los que podemos dividir en dos grupos, de acuerdo al enfoque utilizado para su implementación dentro del marco del Método de los Elementos Finitos: a) modelos de fisuración distribuida y b) modelos de fisura discreta. En los modelos de fisura distribuida, la posibilidad de formación de fisuras es considerada mediante las propiedades de los elementos finitos a través de los cuales se desarrolla la fisuración, asumiendo leyes constitutivas no lineales que incluyen ablandamiento. Aquí se incluyen los modelos de plasticidad y daño mencionados anteriormente. Las fisuras se interpretan en este caso, como el conjunto de los puntos de Gauss convenientemente alineados en los elementos finitos "fracturados". Entre estos modelos se puede a la vez considerar fisuras fijas (Rashid [6], Cervenka [7]) y los de fisura rotatoria (Pramono [8], Etse [9]). En los modelos de fisura discreta, cada fisura es modelada explícitamente e incorpora una discontinuidad en la malla de elementos finitos. En este trabajo se considera la opción de

utilizar elementos de junta de espesor nulo que permiten una aplicación general del criterio de fisura ficticia desarrollado por Hillerborg [10] mediante modelos constitutivos de interfase de tipo normal/tangencial y la incorporación de parámetros de energía de fractura.

MODELO CONSTITUTIVO DE JUNTA

Para el desarrollo del modelo de junta, se supone que los desplazamientos relativos entre agregados y mortero pueden descomponerse en una parte elástica y otra plástica, en analogía con la teoría del flujo de la plasticidad

$$\dot{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{v}}^e + \dot{\mathbf{v}}^p \quad (1)$$

Siguiendo la terminología usada en los problemas de contacto, identificaremos a la componente elástica con la adherencia mientras que a las componentes normal y tangencial de la parte plástica se identificarán con el deslizamiento, independientemente de la dirección del movimiento. El desplazamiento relativo se expresa como

$$\mathbf{v} = v_n \mathbf{e}_n + v_t \mathbf{e}_t \quad (2)$$

Las tracciones \mathbf{q} en la interfase se expresan en función de sus componentes normal y tangencial

$$\mathbf{q} = q_n \mathbf{e}_n + q_t \mathbf{e}_t \quad (3)$$

La relación entre los desplazamientos relativos y las tracciones en la interfase pueden escribirse como (Stankowski [11])

$$\begin{pmatrix} v_n^e \\ v_t^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_n^{-1} & 0 \\ 0 & K_t^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_n \\ q_t \end{pmatrix} \quad (4)$$

El criterio de falla considera que en tracción pura la resistencia se caracteriza por una tensión última, q_{n,f_u} . En el caso de estados combinados de compresión y corte la resistencia involucra la adherencia entre los diferentes materiales y la fricción debida a la rugosidad entre superficies en contacto. En el espacio $q_n - q_t$, el criterio de fractura se expresa como

$$F = |q_t|^a - \frac{(q_{t,f_u})^a}{q_{n,f_u}} (q_{n,f} - q_n) = 0 \quad (5)$$

donde $q_{n,f}$ representa el valor actual de la resistencia normal y $q_{t,f}$ la resistencia al corte. Los valores últimos de la resistencia se indican en la ecuación anterior introduciendo el sub-subíndice u . El parámetro a determina la forma de la superficie de falla $a > 1$ y se define como

$$a = \frac{1}{\mu} \frac{q_{t,f_u}}{q_{n,f_u}} \quad (6)$$

donde μ es el coeficiente de fricción cuando $q_n = 0$. A fin de controlar la dilatación, se emplea una regla de flujo no asociada para el caso de deslizamiento. En este sentido, puede expresarse la regla de flujo en la forma

$$\dot{\mathbf{v}}^p = \dot{\lambda} \mathbf{m} \quad \mathbf{m} = \mathbf{A} \mathbf{n} \quad \mathbf{n} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{q}} \quad (7)$$

donde λ es el multiplicador plástico y

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{\mu}{\nu} \end{pmatrix} \quad \mathbf{n} = \begin{pmatrix} \frac{(q_{t,f_u})^\alpha}{q_{n,f_u}} \\ \alpha q_t^{\alpha-1} \text{sign}(q_t) \end{pmatrix} \quad (8)$$

El comportamiento de postpico para un estado de carga dado se postula en términos de la degradación de la resistencia a tracción o a corte. Esta degradación de la resistencia se postula, para los casos genéricos de tracción pura (modo I de falla) y corte puro (modo II de falla) en la forma

$$G_f^I = \int_0^\infty q_{n,f}(v_n^p) dv - \int_0^\infty q_n(v_n^p) dv \quad (q_t = 0) \quad (9)$$

$$G_f^{II} = \int_0^\infty q_{t,f}(v_t^p) dv = \int_0^\infty q_t(v_t^p) dv \quad (q_n = 0) \quad (10)$$

Para la interface, la relación entre las energías de fractura en modo I y modo II varía generalmente entre 0.01 y 0.1. Se asume aquí que la degradación de la resistencia a tracción sigue una ley exponencial decreciente (Nilsson y Oldenburg (1984), Glemberg (1984) y Willam (1984)) como

$$q_{n,f}(v_n^p) = q_{n,f_u} \exp^{-\alpha v_n^p} \quad \alpha = \frac{q_{n,f_u}}{G_f^I} \quad (11)$$

La cantidad de energía de fractura liberada en tracción pura se define como

$$\kappa(v_n^p) = \int_0^{v_n^p} q_{n,f}(v_n^p) dv - G_f^I \left[1 - \frac{q_{n,f}(v_n^p)}{q_{n,f_u}} \right] \quad (12)$$

o bien

$$q_{n,f}(\kappa) = q_{n,f_u} \left[1 - \frac{\kappa}{G_f^I} \right] \quad (13)$$

Para cualquier otro camino de carga distinto a tracción pura, el deslizamiento es acompañado por un proceso de dilatación. En este caso, se define la tasa de liberación de energía de fractura como

$$\dot{\kappa} = \langle q_n \rangle \dot{v}_n^p + \frac{G_f^I}{G_f^{II}} (q_t - q_{t,r}) \dot{v}_t^p \quad (14)$$

La diferencia $q_t - q_{t,r}$ representa la tensión efectiva de corte, siendo $q_{t,r}$ la resistencia residual de corte.

ANÁLISIS NUMÉRICO

Se presentan a continuación ensayos numéricos de tracción pura a fin de comparar los resultados obtenidos empleando el modelo constitutivo de junta combinando en el análisis por el M.E.F. elementos isoparamétricos Q4 y elementos continuos de junta de cuatro nodos contra los resultados logrados con un modelo constitutivo de fisura rotativa basado en la elastoplasticidad y

que considera conceptos de energía de fractura para la formulación de ablandamiento, el denominado Modelo Extendido de Leon, Etse (1994). En la figura 2 se muestran las discretizaciones de elementos finitos para cada caso. En la malla que considera el elemento de junta central, se empleó el modelo de junta para definir el comportamiento de la interfase, mientras que para los elementos Q4 adyacentes a la junta se consideró un comportamiento elástico perfecto. Para la segunda malla se consideró que el hormigón es representado por el Modelo Extendido de Leon, solamente con elementos de tipo Q4, sin junta entre ellos.

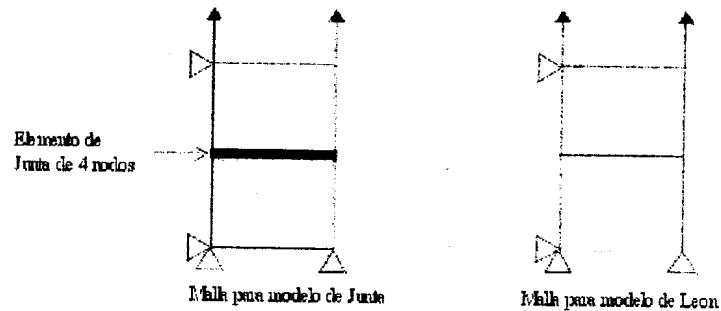


Figura 2: Mallas de elementos finitos

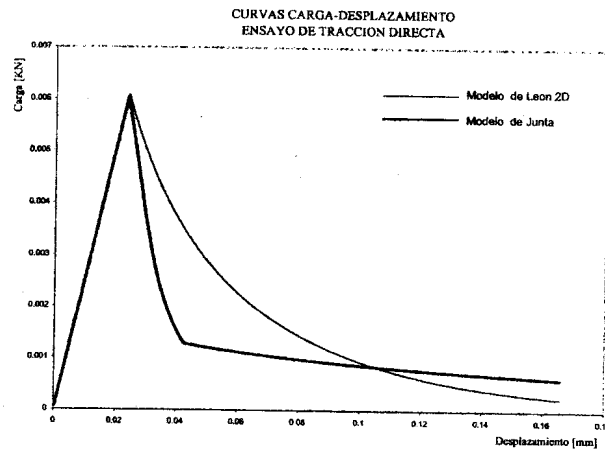


Figura 3: Comparación de respuestas en tracción pura

En la figura 3 se observan las respuestas para cada caso analizado. Se aprecia la fuerte caída de la resistencia que se da en el caso de la malla con elemento de interface y modelo de junta, lo que se debe a que la disipación de la energía liberada en modo I se produce sólo en la junta, la que en este caso representa la formación de una única fisura entre los elementos elásticos. La curva representativa del comportamiento constitutivo del hormigón mediante el Modelo Extendido de Leon presenta una caída de la resistencia a tracción más suave y continua, ya que en este caso la disipación se produce en los dos elementos Q4 casi simultáneamente. En cuanto a la

reproducción de la carga pico, es prácticamente la misma en ambos casos. La figura 4 muestra los resultados para el mismo ensayo pero considerando una discretización con 128 elementos Q4; los resultados indican un comportamiento similar al de las mallas simples, siendo más frágil el comportamiento de pospico obtenido con el modelo de junta, al igual que en el caso anterior.

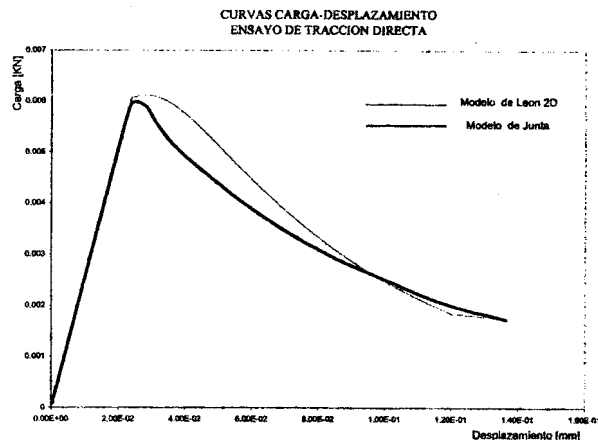


Figura 4: Comparación de respuestas en tracción pura- Malla de 128 elementos Q4

CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo constitutivo micromecánico de junta capaz de representar el comportamiento de la interfase entre materiales compuestos. Los resultados en tracción directa demuestran la capacidad de la formulación constitutiva para captar el comportamiento de pospico mediante el empleo de mallas que incluyen elementos continuos de junta, los que representan la formación de una fisura sólo en la interfase. En el caso del hormigón normal este modo de falla representa la rotura de la pasta de cemento o mortero entre agregados pétreos, de mayor resistencia. Para el caso de hormigones de alta resistencia, este criterio microestructural de modelación de materiales cuasifrágiles puede emplearse considerando juntas también en los agregados.

REFERENCIAS

- [1] Wittman, F. H., *Fracture Energy and Strain Softening of Concrete as Determined by Means of Compact Tension Specimens*. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, 21, 1988, págs. 21-32.
- [2] Carol, I., Prat, P. C. *Smearred Analysis of Concrete Fracture Using a Microplane Based Multicrack Model With Static Constraint*. J.G.M. van Mier, J.G. Rots and A. Bakker editors, Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics, 1991, págs. 619-628.
- [3] Bazant, Z. P., Kim, S. *Plastic-Fracturing Theory For Concrete*. J. Engng. Mechanics, Div ASCE, 105, 1979, págs. 407-428.
- [4] Ortiz, M. *A Constitutive Theory For the Inelastic Behavior of Concrete*. Mechanics of Materials, 4, 1985, págs. 67-93.

- [5] **Simo, J. G. and Ju, J.W.** *Strain and Stress-Based Continuum Damage Models -I Formulation.* Int. Journal Sol. and Structures, 23(7), 1987, págs. 821-840.
- [6] **Rashid, Y. R.** *Analysis of Prestressed Concrete Pressure Vessels .* Nuclear Engineering and Design, 7, 1968, págs. 334-344.
- [7] **Cervenka, J.** *Discrete Crack Modelling in Concrete Structures.* PhD Thesis, University of Colorado, Boulder, colorado, EE. UU.
- [8] **Pramono, E., Willam, K.** *Fracture Energy-Based Plasticity Formulation of Plain Concrete.* Journal of Engng. Mechanics, ASCE, 115(6), 1989, págs. 1183-1204.
- [9] **Etse, G.** *Theoretische und Numerische Untersuchung zum Diffusen und Lokalisierten Versagen in Beton.* Dr-Ing. Thesis, University of Karlsruhe,Karlsruhe, Germany.
- [10] **Hillerborg, A.** *A Model for Fracture Analysis.* Technical Report, TVBM-3005, Div. of Building Materials,1978. The Lund Institute of Technology, Lund Sweden.
- [11] **Stankowski, T.** *Numerical Simulation of Progressive Failure in Particle Composites.* PhD Thesis, University of Colorado,1990, Boulder, Colorado, EE. UU.
- [12] **López Garello, C. M.** *Análisis Microestructural de la Fractura del Hormigón Utilizando Elementos Tipo Junta. Aplicación a Diferentes Hormigones.* Tesis doctoral, Universitat Politècnica de catalunya, 1999. Barcelona, España.