

UN MODELO DE FISURACIÓN DEL HORMIGÓN EN MODO MIXTO MEDIANTE FISURA COHESIVA EMBEBIDA: CONTRASTACIÓN EXPERIMENTAL

E. Reyes¹, D. Cendón², J.M. Sancho³, J. Planas² y J.C. Gálvez¹

¹E.T.S. Ingenieros de Caminos, Universidad de Castilla La Mancha,
Av. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, España.

²Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. Ingenieros de Caminos,
Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.

³Departamento de Estructuras de Edificación, E.T.S. Arquitectura,
Universidad Politécnica de Madrid, Av. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, España.

Resumen. El empleo de modelos de fisura cohesiva discreta para simular la fractura en modo mixto I/II de hormigones y morteros encuentra como dificultad la necesidad de conocer la dirección de la grieta a medida que progresa. Cuando se trabaja con el método de los elementos finitos este aspecto requiere proceder al remallado del modelo según crece la grieta. En la primera parte de este trabajo se ha presentado un modelo de elemento finito con una discontinuidad embebida que incorpora el modelo de la fisura cohesiva. La ventaja fundamental es que evita el remallado del modelo cuando la grieta crece. El modelo incorpora solo parámetros del material medibles experimentalmente mediante ensayos normalizados. En esta segunda parte del trabajo se simulan los ensayos de fractura en modo mixto I/II propuestos por varios investigadores, obteniéndose un ajuste razonable.

Abstract. The discrete crack approach, based on the cohesive models, has been successful for modelling the mixed mode I/II fracture of concrete and mortar. A main difficulty of this approach, when the Finite Element Method is adopted, is the need of remeshing the model when the crack grows. The first part of the work has presented a finite element model with an embedded cohesive crack. The main advantage of this approach is to avoid the remeshing of the model when the crack grows. All the parameters of the model can be measured by standard methods. This paper, the second part of the work, shows the numerical simulations of experimental tests, a good fit is reached.

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace años se ha realizado un importante esfuerzo encaminado a simular la fractura en modo mixto I/II de hormigones y morteros mediante modelos de fisura discreta cohesiva [1-3]. Una de las principales dificultades que se encuentran cuando se trabaja con el Método de los Elementos Finitos es la necesidad de remallar el modelo a medida que la grieta progresa. Hace algunos años se ha propuesto una alternativa denominada *Modelo de Discontinuidad Fuerte* (MDF) [4]. La diferencia fundamental con los modelos clásicos de fisura discreta es que el crecimiento de la grieta no está restringido a las caras entre elementos finitos, sino que el salto en el campo de desplazamientos que genera la grieta es incorporado en la formulación de los desplazamientos dentro del propio elemento finito. Un estudio comparativo de los tipos de MDF se recoge en [5].

El empleo de modos incompatibles [6] para reproducir el salto de la discontinuidad embebida suele producir el bloqueo de la grieta en su progresión. Oliver [7-8] ha propuesto el uso de algoritmos de trazado (*tracking*),

que establecen zonas de exclusión en el crecimiento de la grieta, y que han proporcionado buenos resultados. Sin embargo, la implementación de algoritmos de trazado en los programas de elementos finitos usuales dista mucho de ser inmediata.

Como se ha puesto de relieve en la primera parte de este trabajo [9], en la fractura del hormigón es posible abordar el problema, de un modo más sencillo y directo, mediante un modelo constitutivo discreto que relaciona las tensiones en los labios de la grieta (discontinuidad) con el salto en el campo de los desplazamientos en la línea de la discontinuidad. En la ref^a [9] se ha presentado la formulación de este modelo y su incorporación en un elemento finito con fisura cohesiva embebida. En esta segunda parte del trabajo se muestran los resultados obtenidos con el modelo al simular la fractura en modo mixto del hormigón, para ello se reproducen los resultados experimentales obtenidos por diversos autores, alcanzándose un ajuste razonable. Los parámetros de fractura que incorpora el modelo son solo de modo I y predice de forma ajustada la fractura en modo mixto I/II del hormigón y el mortero.

2. RESUMEN DEL ELEMENTO FINITO CON FISURA COHESIVA EMBEBIDA

Como se ha indicado en [9], los autores [3, 10] han mostrado que la mayoría de los resultados publicados sobre fractura en modo mixto I/II de hormigones y morteros corresponden a ensayos en los que la grieta progresa bajo un modo I local predominante, lo que permite modelar el comportamiento de fractura en modo mixto global a partir de las propiedades en fractura del hormigón en modo I. En este trabajo se ha adoptado un modelo sencillo, denominado *modelo de fuerzas centrales*, en el que el vector de tensiones \vec{t} que actúa sobre las caras de la fisura cohesiva es paralelo al desplazamiento relativo \vec{w} de los labios de la grieta (Figura 1). La fisura cohesiva queda así caracterizada por la curva de ablandamiento, que relaciona el módulo de \vec{t} con el módulo de \vec{w} , tal y como se esquematiza en la Figura 1. En este trabajo se ha adoptado una curva de ablandamiento de tipo exponencial [11], con descargas al origen.

En la formulación adoptada el elemento finito lleva embebida una grieta recta (Fig. 2). Las expresiones del campo de desplazamientos en el interior del elemento finito cuando la grieta se abre se presentan en la primera parte de este trabajo [9]. Así mismo, en [9, 12, 13] se desarrolla la formulación correspondiente a la incorporación de la fisura cohesiva en un elemento finito triangular de deformación constante con una fisura embebida. El modelo se ha incorporado mediante una subrutina de usuario en el programa comercial de elementos finitos ABAQUS®, y en el programa FEAP.

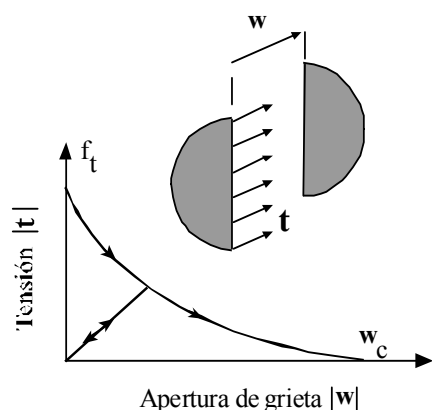


Fig. 1. Esquema de la curva de ablandamiento y de la apertura de la discontinuidad.

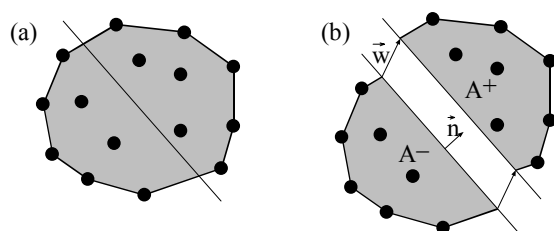


Fig. 2. Elemento finito con una fisura embebida con abertura constante: a) elemento genérico con nodos y línea de fisuración, b) salto en la fisura (\vec{w}).

3. SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS DE FRACTURA EN MODO MIXTO

3.1. Ensayos de Arrea e Ingraffea

Los ensayos de Arrea e Ingraffea [14] son empleados tradicionalmente para contrastar los modelos de fractura en modo mixto I/II de hormigón y mortero. En sus ensayos no midieron la energía de fractura, G_F , ni la resistencia a tracción, f_t , por lo que han sido estimados a partir del Código Modelo [15]. Las propiedades del material empleadas en el cálculo se recogen en la Tabla 1. La geometría y dimensiones de las probetas se muestran en la Fig.3. La Fig. 4 muestra la malla de elementos finitos deformada.

La Fig. 5 muestra la envolvente experimental y la predicción numérica de las curvas carga P frente al deslizamiento tangencial medido en la boca de la entalla (CMSD).

3.2. Ensayos de los autores

Los ensayos de Gálvez *et al.* [16] se realizaron con vigas de flexión en tres puntos y cuatro puntos, denominados ensayos tipo 1 y 2 respectivamente. Las propiedades del material se recogen en la Tabla 1. La geometría y dimensiones de las probetas se muestran en la Fig. 6. La Fig. 7 muestra la malla de elementos finitos deformada correspondiente a los ensayos tipo 2.

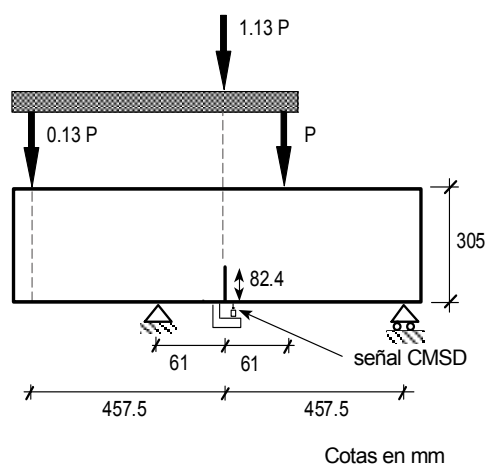


Fig. 3. Geometría, fuerzas y condiciones de contorno de los ensayos de Arrea e Ingraffea [14].

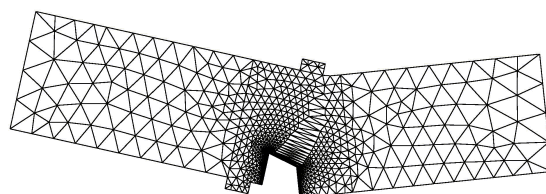


Fig. 4. Malla de elementos finitos deformada en la simulación de los ensayos de Arrea e Ingraffea [14].

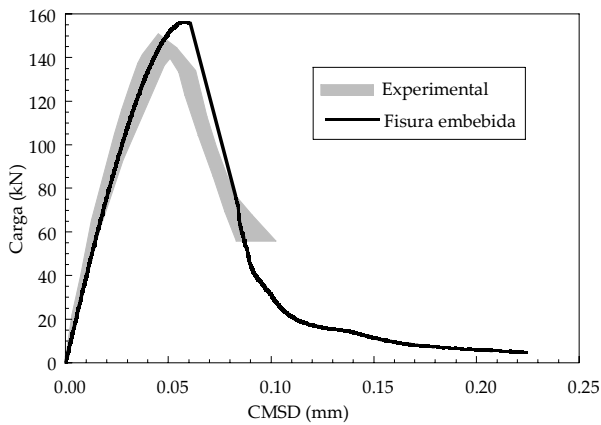


Fig. 5. Envolvente experimental y predicción numérica de los ensayos de Arrea e Ingraffea [14]: curvas P -CMSD.

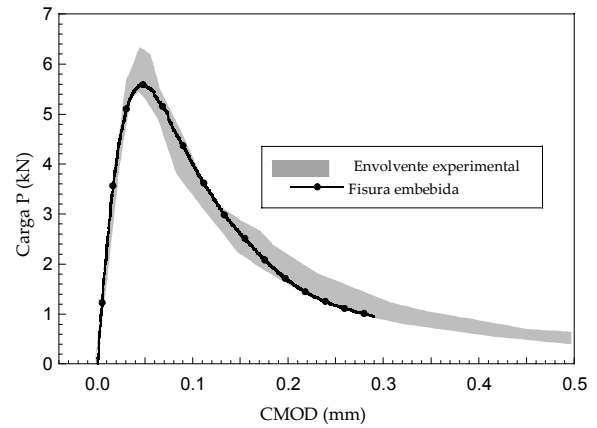


Fig. 8. Envolvente experimental y predicción numérica de los ensayos *tipo 1* de Gálvez *et al.* [16]: curvas P -CMOD.

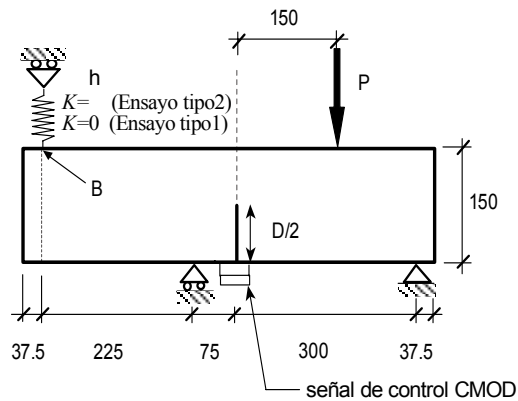


Fig. 6. Geometría, fuerzas y condiciones de contorno de los ensayos de Gálvez *et al.* [16].

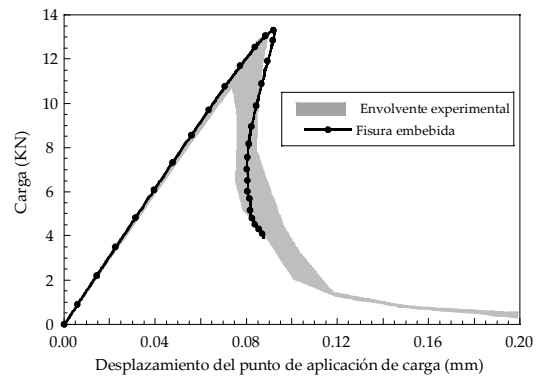


Fig. 9. Envolvente experimental y predicción numérica de los ensayos *tipo 2* de Gálvez *et al.* [16]: curvas P -desplazamiento del punto de aplicación de la carga.

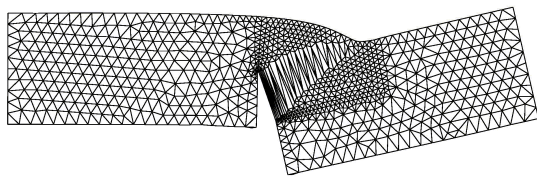


Fig. 7. Malla de elementos finitos deformada en la simulación de los ensayos *tipo 2* de Gálvez *et al.* [16].

Tabla 1. Propiedades mecánicas del hormigón.

Hormigón	G_F N/m	f_t MPa	E GPa	ν
Arrea e Ingraffea [14]	105	3.5	24.8	0.18
Gálvez <i>et al.</i> [16]	69	3.0	38	0.2
Schlangen [17]	100	2.8	35	0.15
Shi <i>et al.</i> [18]	50	3.0	31	0.2

La Fig. 8 muestra la envolvente experimental y la predicción numérica de las curvas carga P frente a la apertura de la boca de la entalla (CMOD) en las probetas tipo 1. La Fig. 9 muestra análogos resultados para las probetas tipo 2, en este caso las curvas carga P frente al desplazamiento vertical del punto de aplicación de la carga.

3.3. Ensayos de Schlangen

La Fig. 10 muestra la geometría y disposición de los ensayos desarrollados por Schlangen [17]. Se trata de ensayos de flexión en cuatro puntos. Las propiedades del material se recogen en la Tabla 1.

La Fig. 11 muestra la envolvente experimental y la predicción numérica de las curvas carga P frente al deslizamiento tangencial medido en la boca de la entalla (CMSD). Similares resultados se obtuvieron para las curvas carga P frente al CMOD.

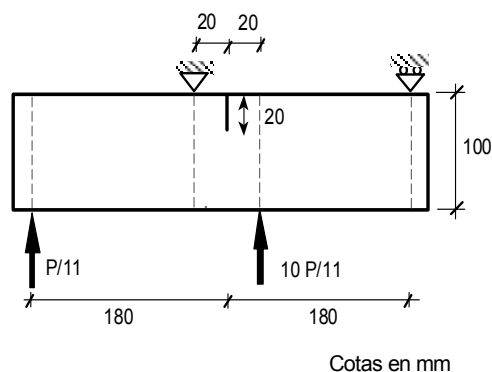


Fig. 10. Geometría, fuerzas y condiciones de contorno de los ensayos de Schlangen [17].

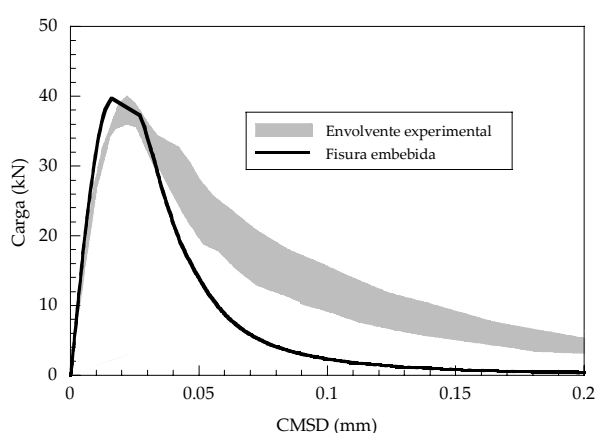


Fig. 11. Envolvente experimental y predicción numérica de los ensayos de Schlangen [17]: curvas P -CMSD.

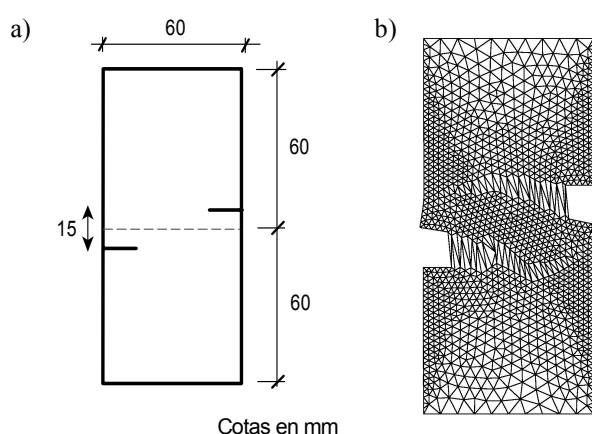


Fig. 12. a) Geometría y dimensiones de las probetas de con doble entalla de los ensayos de Shi *et al.* [18]. b) Malla de elementos finitos deformada en la simulación de los ensayos de Shi *et al.* [18].

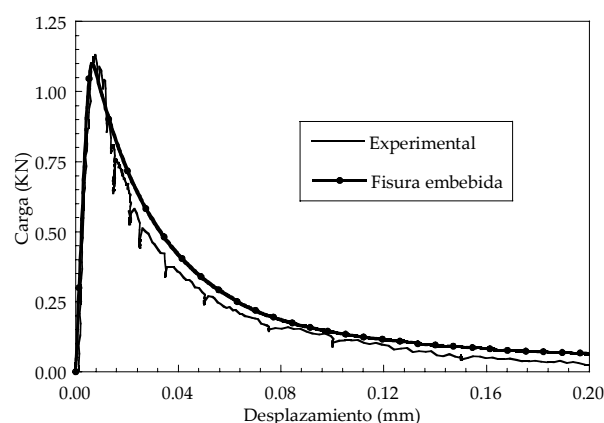


Fig. 13. Curva experimental y predicción numérica de los ensayos Shi *et al.* [18].

3.4. Ensayos de Shi *et al.*

Shi *et al.* [18] propusieron ensayos de tracción con probetas doblemente entalladas. La Fig. 12a muestra la geometría y dimensiones de las probetas ensayadas. Para realizar los ensayos de tracción las caras superior e inferior de las probetas fueron pegadas a los platos de tracción [18]. La Fig. 12b muestra la malla de elementos finitos deformada.

La Fig. 13 compara la curva experimental carga P frente al desplazamiento vertical de la cara superior de la probeta con la predicción numérica.

4. COMENTARIOS FINALES

En la primera parte del trabajo [9] se ha presentado un modelo de fisura cohesiva embebida en un elemento finito. El modelo incorpora parámetros del material medibles experimentalmente mediante ensayos normalizados. Los parámetros de fractura incorporados corresponden al modo I, y con ellos se predice de forma razonable la fractura en modo mixto I/II del hormigón y el mortero.

El modelo propuesto se ha incorporado en un elemento finito triangular de deformación constante. La formulación presentada evita incorporar algoritmos de trazado (*tracking*) para conocer el camino que sigue la grieta al propagarse. Este aspecto ha permitido incorporar la formulación desarrollada en códigos de elementos finitos estándar. En este trabajo el modelo se ha incorporado a los programas de elementos finitos ABAQUS® y FEAP mediante sendas subrutinas de usuario.

El modelo desarrollado se ha empleado para simular los resultados experimentales de los ensayos de fractura en modo mixto I/II de hormigón y mortero más representativos. El modelo predice los resultados experimentales de forma razonable y su convergencia

numérica es buena. Conviene destacar que las propiedades empleadas por el modelo se obtienen mediante ensayos normalizados independientes y distintos de los ensayos de fractura en modo mixto simulados.

Por todo ello creemos que el modelo de fisura cohesiva embebida presentado constituye una alternativa sencilla y válida para la simulación de la fractura del hormigón en modo mixto I/II, complementaria a otros modelos más sofisticados y complejos que requieren el uso de un mayor número de parámetros del material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comunidad Económica Europea y al Ministerio de Ciencia y Tecnología las ayudas económicas concedidas a través de los proyectos EVK4-2001-00091, MAT2001-3863-CO3-01 y MAT2001-3863-CO3-02. Así mismo agradecen a la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha la ayuda concedida a través del proyecto PBI-02-006. También agradecen al Prof. Javier Oliver su asesoramiento durante el desarrollo del trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Cervenka, J., "Discrete crack modelling in concrete structures", Tesis Doctoral, Universidad de Colorado, (1994).
- [2] Valente, S. "On the cohesive crack model in mixed-mode conditions", en *Fracture of Brittle Disordered Materials: Concrete, Rock and Ceramics*, E&FN Spon, pp. 66-80, (1995).
- [3] Cendón, D.A., Gálvez, J.C., Elices, M. Y Planas, J. "Modelling the fracture of concrete under mixed mode loading", *Int. Journal of Fracture*, 103, 293-310 (2000).
- [4] Simó, J.C., Oliver, J. y Armero, F., "An analysis of strong discontinuities induced by strain softening in rate-independent inelastic solids", *Computational Mechanics*, 12, 277-296, (1993).
- [5] Jirásek, M., "Comparative study on finite elements with embedded cracks", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 188, 307-330, (2000).
- [6] Simó, J.C. y Rifai, S., "A class mixed assumed strain methods and the method of incompatible modes", *Int. Journal for Numerical Methods*, 29, 1595-1638, (1990).
- [7] Oliver, J., "Modelling strong discontinuities in solid mechanics via strain softening constitutive equations. Part I: fundamentals. Part 2: numerical simulation", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39, 3575-3623, (1996).
- [8] Oliver, J. y Huespe, A. "On strategies for tracking strong discontinuities in computational failure mechanics", *Fifth World Congress on Computational Mechanics*, Ed. Mang, Rammerstorfer and Eberhardsteiner, Viena, 15 pp., (2002).
- [9] Sancho, J.M., Planas, J., Cendón, D.A., Reyes, E. y Gálvez, J.C., "Un modelo de fisuración del hormigón en modo mixto mediante fisura cohesiva embebida: fundamento teórico", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 21, (en imprenta), 2004.
- [10] Gálvez, J.C., Cendón, D.A. y Planas, J. "Influence of shear parameters on mixed-mode fracture of concrete", *Int. Journal of Fracture*, 118, 163-189 (2002).
- [11] Bazant, Z.P y Planas, J., "Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials", CRC Press, (1998).
- [12] Sancho, J.M., Planas, J. y Cendón, D.A., "An embedded cohesive crack model for finite element analysis of concrete fracture", *Fracture Mechanics of Concrete Structures (FRAMCOS V)*, 8 pp., (*in press*), (2004).
- [13] Reyes, E., "Rotura de la fábrica de ladrillo bajo solicitaciones de tracción y cortante", Tesis Doctoral, Universidad de Castilla La Mancha, (2004).
- [14] Arrea, M. e Ingraffea, A., "Mixed mode crack propagation in mortar and concrete", Report 81-13, Cornell University, (1982).
- [15] CEB-FIP, "Model Code 1990", Laussane, (1991).
- [16] Gálvez, J.C., Elices, M., Guinea, G.V. y Planas, J., "Mixed mode fracture of concrete under proportional and non-proportional loading", *Int. Journal of Fracture*, 94, 267-284 (1998).
- [17] Schlangen, E., "Experimental and numerical analysis of fracture processes in concrete", Tesis Doctoral, Delft University of Technology, The Netherlands, (1993).
- [18] Shi, C., van Dam, A.G., van Mier, J.G.M. y Sluys, L.J., "Crack interaction in concrete", *Materials for Buildings and Structures EUROMAT*, Wittmann Ed., 6, 125-131, (2000).

