

# SIMULACIÓN DE LA FRACTURA DE LA FÁBRICA DE LADRILLO BAJO SOLICITACIONES DE TRACCIÓN Y CORTANTE USANDO UN ELEMENTO DE FISURA COHESIVA EMBEBIDA

E. Reyes<sup>1</sup>, M.J. Casati<sup>1</sup>, J.C. Gálvez<sup>1</sup>, D.A. Cendón<sup>2</sup>, J.M. Sancho<sup>3</sup> y J. Planas<sup>2</sup>

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

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

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

**Resumen.** Los muros de fábrica de ladrillo presentan una abundante patología de fisuración bajo solicitaciones de tracción y cortante. Existe por tanto la necesidad de avanzar en la simulación y predicción del comportamiento de la fábrica bajo esta combinación de esfuerzos. El comportamiento cuasi-frágil de la fábrica de ladrillo puede ser estudiado haciendo uso de modelos de fisura cohesiva, cuya aplicación a hormigón ha aportado resultados muy satisfactorios. Recientemente ha sido desarrollado un elemento finito con discontinuidad embebida basado en el modelo de fisura cohesiva. El modelo extiende el elemento con fisura embebida propuesto por los autores para materiales cohesivos isótropos a materiales anisótropos. En este trabajo se resume la formulación del elemento finito, así como su contrastación experimental con ensayos llevados a cabo por los autores. Para ello se simulan con este modelo una serie de ensayos de flexión en tres puntos con entalla asimétrica realizados en fábrica a escala 1/4, con distinta inclinaciones de las hiladas: 0, 45, -45 y 90 grados, obteniéndose un buen ajuste.

**Abstract.** Brickwork masonry walls frequently exhibit cracks formed under tensile/shear loading. A research on this type of failure calls for a detailed numerical modelling development. The quasi-brittle behaviour of brickwork masonry can be treated using the discrete crack approach, which has been successful for modelling the mixed mode I/II fracture of concrete and mortar. Recently, an embedded crack finite element has been proposed based on the cohesive models. This model extends the embedded crack finite element, proposed by the authors for isotropic cohesive materials, to anisotropic cohesive materials. This work shows a summary of the finite element formulation, and it compares the numerical prediction with experimental results of bending tests of brickwork masonry 1/4 scaled with four different inclinations of the bed joints (0, 45, 90 and -45 degrees) made by the authors. A good fit is reached.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para estudiar el comportamiento mecánico de la fábrica de ladrillo, y especialmente su rotura, es importante tener presente que se trata de un material compuesto, cuyas propiedades mecánicas y resistentes dependen de las de sus materiales constituyentes. Además, la disposición geométrica en hiladas del ladrillo y el mortero, así como de la intercara entre ambos, hace que estas características dependan en gran medida de la dirección que se someta a estudio, ya que a priori las juntas pueden ser consideradas como planos de debilidad [1-3]. Adquiere mucha importancia, por tanto, la orientación de la fábrica frente a la dirección de las cargas que la solicitan, así como frente a la dirección de crecimiento de las grietas [1-3].

Tradicionalmente, la simulación numérica de la fractura en modo mixto I/II de la fábrica de ladrillo se ha hecho con modelos de daño, usando macromodelos. También se han empleado elementos de intercara para representar la fisura discreta, desde un punto de vista microscópico.

Ambos procedimientos han sido utilizados con éxito por distintos autores, especialmente cuando han incluido en la formulación el concepto de fisura cohesiva. El principal obstáculo que surge al usar elementos finitos con fisura cohesiva, es la necesidad de remallar el modelo conforme la grieta va creciendo.

En este trabajo se presenta la adaptación, para materiales anisótropos, de un modelo que emplea un elemento finito con discontinuidad embebida basado en el modelo de la fisura cohesiva, que no requiere el remallado ni el cálculo previo del camino de la grieta. Esta aproximación propuesta por los autores ha mostrado buen comportamiento en la simulación de la rotura en modo mixto de materiales isótropos [3 y 4].

Además este trabajo presenta la contrastación del modelo con los resultados de la campaña experimental realizada por los autores en probetas de fábrica de ladrillo a escala 1/4 con distintas inclinaciones de la hiladas. El trabajo concluye con unos comentarios finales.

## 2. COMPORTAMIENTO DE LA FÁBRICA DE LADRILLO

La fábrica de ladrillo es un material compuesto, constituido por la combinación de dos componentes básicos: el ladrillo y el mortero. El resultado es un material heterogéneo, en el que, en todo su dominio, los componentes normalmente guardan igual proporción y distribución. En el modelo que se propone en este artículo, la aproximación al comportamiento en rotura en modo mixto de la fábrica se realiza desde un punto de vista macroscópico y se admite que este material se comporta como un medio homogéneo anisótropo. Este planteamiento busca una solución de compromiso entre precisión y sencillez, para que el modelo sea aplicable a problemas reales. Por supuesto considerar la fábrica de ladrillo como un medio homogéneo anisótropo es una hipótesis que tiene su campo de aplicación natural en elementos estructurales grandes, y que por lo tanto estén sometidos a unas cargas y condiciones de contorno tales, que su estado de tensiones y de deformaciones pueda ser asumido como uniforme. Esto es debido a que en realidad el material es heterogéneo, y para una modelación más ajustada, en un análisis del material mucho más en detalle, se necesita considerar en el modelo de forma separada las piezas de ladrillo y las juntas de mortero, es decir es necesaria la micromodelación [2, 6].

Conviene destacar el hecho contrastado experimentalmente, de que el comportamiento de la fábrica de ladrillo está marcadamente influenciado por la orientación de los tendeles respecto a las cargas aplicadas [5]. El fallo de la fábrica de ladrillo ocurre por dos mecanismos básicos, según que la rotura ocurra a través de las juntas, o de forma combinada a través de las piezas y las juntas [3]. En la campaña experimental realizada por los autores de rotura de fábrica de ladrillo bajo solicitaciones de tracción y cortante [1, 3 y 7], así como en otras existentes en la literatura [5], se ha observado que si se somete a un panel de fábrica de ladrillo a sucesivos estados tensionales, en los que el ángulo que forma la dirección de máxima tensión de tracción con las direcciones principales del material (dirección de los tendeles y las llagas), se hace variar de forma continua, la orientación en la que se produce la fisuración de la fábrica de ladrillo tiene una progresión discontinua. El cambio de dirección del agrietamiento se produce “a saltos”, cambiando el mecanismo de fallo así como la resistencia del material [3].

Resulta, por tanto, evidente la importancia crucial que tiene la influencia de las juntas en la rotura de la fábrica de ladrillo, particularmente la de los tendeles que, debido a su continuidad geométrica, crean planos en los que el material es normalmente más débil, originando una gran direccionalidad.

A la vista de estos condicionantes de la fábrica, en este trabajo, se plantea la extensión a la rotura de la fábrica del modelo de fisura embebida desarrollado por los autores [3 y 4] para la fractura de materiales isótropos, y

que ha funcionado correctamente con hormigones y morteros. Para ello se plantea la formulación tenso-deformacional de un material anisótropo como medio continuo y se utiliza un criterio de Rankine generalizado para la iniciación de su fisuración.

## 3. MODELOS CONTINUOS ANISÓTROPOS

La formulación de la Mecánica de Medios Continuos para materiales anisótropos se ha desarrollado hace tiempo. Sin embargo, no hay modelos suficientemente contrastados para el caso particular de la fábrica, especialmente bajo solicitaciones de tracción y cortante [8].

En el contexto de esta investigación se utiliza el Método de los Elementos Finitos para integrar las leyes del comportamiento tenso-deformacional de la fábrica y hacer posible la modelación de cualquier estructura por ordenador. Evidentemente la discretización de una estructura de un material compuesto, como la fábrica de ladrillo, en una malla de elementos finitos bajo la hipótesis de medio homogéneo anisótropo, desde una perspectiva macroscópica, resulta mucho más económica. Para ello se necesita una ley de comportamiento global del compuesto, donde se tengan acotadas el espacio de tensiones y deformaciones admisibles, tanto en el rango lineal como en el no lineal. Esto se consigue admitiendo algunas simplificaciones sobre su comportamiento, de donde se extraen diferentes modelos, que en general se denominan macromodelos.

Normalmente los macromodelos emplean ecuaciones constitutivas estándar, desarrolladas para materiales homogéneos e isótropos, modificadas para recoger comportamiento anisótropo.

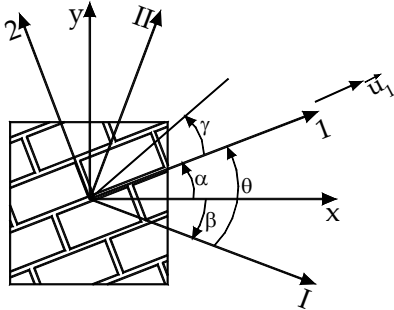
Los condicionantes más importantes del comportamiento de la fábrica de ladrillo se han expuesto en el apartado anterior. Es preciso destacar que, en el caso de la fábrica, no es posible formular un criterio de rotura exclusivamente en términos de tensiones principales. En estados tensionales bidimensionales, como es el caso de este trabajo, es necesario considerar el vector de tensiones completo,  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})^T$ , así como los ejes principales del material (dirección de los tendeles y de las llagas). Un camino alternativo es utilizar las tensiones principales y un ángulo  $\theta$  que mida la rotación que presentan los ejes principales de tensiones con los ejes principales del material. Evidentemente, para cada valor de  $\theta$  se encuentra un diagrama de tensiones principales diferente [3, 5]. Para el material objeto de estudio se propone un comportamiento de material elástico anisótropo, con un criterio de Rankine generalizado para su rotura. Esto representa una extensión a la fábrica de la formulación habitualmente utilizada para materiales cuasi-frágiles isótropos.

#### 4. CRITERIO DE ROTURA TIPO RANKINE GENERALIZADO

En este apartado se propone un criterio de iniciación de la rotura para el modelo de la fisura embebida en materiales anisótropos, tomando como base el criterio de Rankine.

Se ha comprobado experimentalmente que las propiedades mecánicas y resistentes de la fábrica de ladrillo dependen de la dirección que se considere. En el macromodelo que se presenta en este trabajo, se pretende llegar a un compromiso entre exactitud y sencillez.

Considérese un panel de fábrica de ladrillo con los tendeles orientados según la dirección del vector unitario  $\vec{u}_1$ , eje principal del material, como el que se muestra en la Fig. 1. Los ejes de coordenadas  $OX$  y  $OY$ , en el caso de una simulación numérica cualquiera, no tienen por qué coincidir con los ejes principales del material,  $I-2$ , orientación de los tendeles y de las llagas respectivamente, si no que en general formarán un ángulo  $\alpha$ . Por otro lado los ejes principales de tensiones,  $I-II$ , normalmente formarán un ángulo  $\beta$  con los ejes coordenados. Se pretende encontrar el ángulo  $\gamma$  con el que se iniciará una fisura al llegar al límite de la resistencia. El ángulo  $\theta$ , que ya ha sido definido, mide la rotación que presentan los ejes principales de tensiones con los ejes principales del material, y es la suma de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ .



**Fig. 1.** Definiciones geométricas para el criterio de rotura.

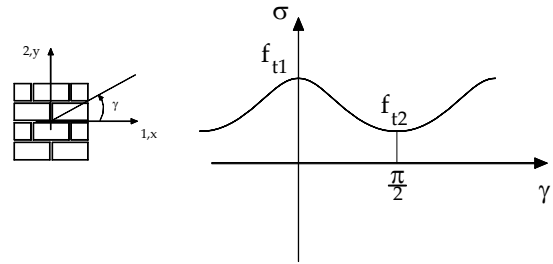
De forma estricta cada vez que se pretendiera estudiar un caso concreto, se necesitaría caracterizar la fábrica en un gran número de direcciones diferentes, lo cual resultaría una ardua tarea, imposible de llevar a la práctica de forma habitual. Con objeto de evitar este inconveniente, en el modelo propuesto de fisura embebida para la fábrica de ladrillo propuesto, se caracteriza el material en dos direcciones representativas, por ejemplo en sus ejes principales. El modelo asume que estas propiedades varían con el ángulo  $\gamma$ , medido a partir de la dirección de los tendeles, de acuerdo con una determinada curva conocida, función de  $\gamma$ . Por supuesto, al considerar ablandamiento de la capacidad resistente de la fábrica

también habrá una dependencia de sus propiedades resistentes con la historia de carga, pero en el inicio de la fisuración sólo influye la dirección en estudio.

Es posible utilizar distintas leyes de variación de las propiedades resistentes básicas del modelo, para este caso resistencia a tracción y energía de fractura, en función de los resultados experimentales. En este trabajo, por simplicidad y para evitar los posibles problemas de convergencia que pueden acarrear los puntos angulosos, se ha optado por una curva de tipo sinusoidal (véase Fig.2). Así, la resistencia a tracción viene dada por la expresión:

$$f_t(\gamma) = \frac{f_{t1} + f_{t2}}{2} + \frac{f_{t1} - f_{t2}}{2} \cos 2(\gamma) \quad (1)$$

donde  $f_{t1}$  y  $f_{t2}$ , son la resistencia a tracción para la dirección de los tendeles y de las llagas respectivamente. Debido a la simetría de la fábrica, esta ley es simétrica respecto al eje  $f_t(\gamma)$ , y tiene un periodo  $\pi$ .



**Fig. 2.** Variación sinusoidal de la resistencia a tracción de la fábrica.

Si en determinado punto de la fábrica se tiene un estado plano de tensiones, definido por el vector completo de tensiones,  $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})^T$ , entonces en la dirección que forma un ángulo  $\gamma$  con los tendeles la tensión normal obedece a la siguiente expresión sinusoidal:

$$\sigma_\gamma = (\sigma \cdot \vec{u}_\gamma)_n = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2(\gamma + \alpha) - \tau_{xy} \sin 2(\gamma + \alpha) \quad (2)$$

En el caso de la fábrica de ladrillo la resistencia no es constante, por lo que se compara la tensión normal que se tiene en la dirección cualquiera  $\gamma$  con la resistencia a tracción que el material presenta en esa dirección. De esta forma se tiene un criterio de iniciación tipo Rankine generalizado, que se expresaría según la siguiente ecuación:

$$\sigma_\gamma = f_t(\gamma) \quad (3)$$

Sin embargo, la ecuación (3) no es condición suficiente, ya que para que estas dos curvas se corten en un solo punto, además tienen que ser tangentes en ese punto, por lo que se impone otra condición:

$$\sigma'_\gamma = f'_t(\gamma) \quad (4)$$

La ecuación (4) expresa que la pendiente de las curvas de la tensión normal y la resistencia a tracción, para la dirección de inicio de la fisuración, coinciden.

#### 4. ELEMENTO FINITO CON FISURA EMBEBIDA

Una vez expuestas las características diferenciadoras de un material como la fábrica, se han introducido las siguientes modificaciones al modelo de fisura embebida desarrollado por los autores [3 y 4] para materiales isotropos, con objeto de tenerlas en cuenta:

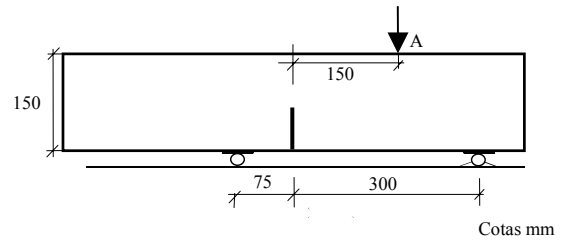
- se asume que el material que queda fuera de la fisura presenta un comportamiento homogéneo elástico lineal ortótropo, aprovechando las simetrías del material respecto de sus ejes principales;
- el criterio de fisuración es el de Rankine generalizado.

Con estas modificaciones hechas al modelo de fisura discreta embebida para materiales isotropos [3 y 4], se ha programado un triángulo de deformación constante, en el programa comercial ABAQUS®, siguiendo la metodología presentada en [4].

Se parte de la formulación de discontinuidades fuertes descrita en [4], las ecuaciones constitutivas son las que corresponden a un material ortótropo. Una vez iniciada la fisuración, los desplazamientos de la fisura se modelan con una aproximación discreta, concentrando en la discontinuidad fuerte todo el salto de desplazamientos. El vector de tracciones, transmitido a través de los labios de la grieta, se obtiene a partir de dicho salto de desplazamientos, la abertura de la fisura, por medio de una curva cohesiva de tracción-separación. En este trabajo se ha adoptado, por su sencillez, una curva de ablandamiento exponencial. Los parámetros que definen la curva de ablandamiento, resistencia a tracción y la energía de fractura, son función de la dirección de la grieta formada en el material.

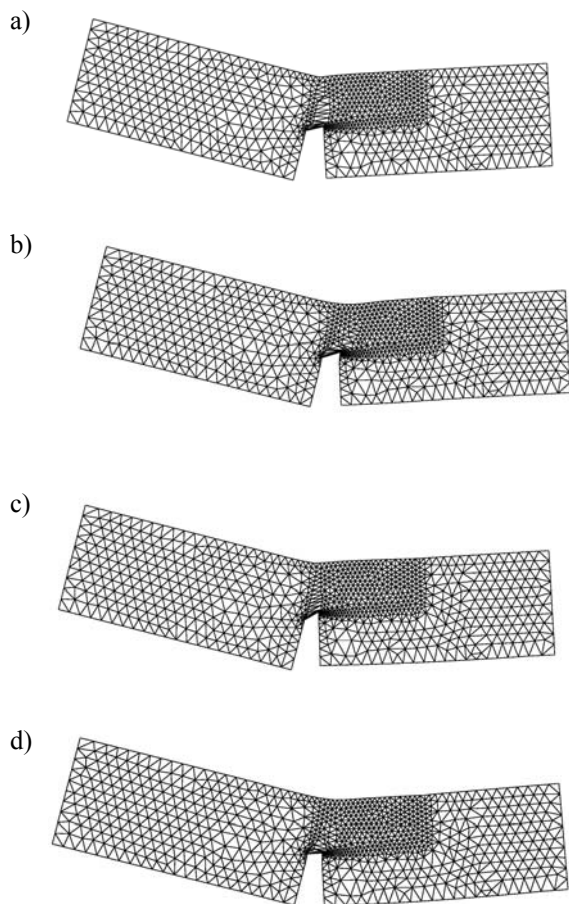
#### 5. SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS DE ROTURA DE FÁBRICA EN MODO MIXTO

El modelo se ha contrastado con los resultados experimentales obtenidos en la campaña de ensayos realizada por los autores [1, 3 y 7] con fábrica de ladrillo a escala 1/4. Para ello se han simulado los ensayos de probetas de flexión con una entalla solicitadas a carga asimétrica aplicada en tres puntos, según el esquema de la Fig. 3. Los parámetros del material utilizados, correspondientes a sus ejes principales, notados por los subíndices 1 y 2, son:  $E_1=28$  GPa,  $E_2=18$  GPa,  $\nu_{12}=0.2$ ,  $G_{12}=10$  GPa,  $f_{t1}=5.8$  MPa,  $f_{t2}=2.4$  MPa y  $G_F=0.075$  N/mm.



**Fig. 3.** Geometría, fuerzas y condiciones de contorno de los ensayos de flexión asimétrica de probetas fábrica de ladrillo a escala 1/4 [1, 3 y 7].

La Fig. 4 muestra las deformadas de las mallas utilizadas en el cálculo para las cuatro orientaciones de tendeles estudiadas: 0, 45, 90 y -45 grados. La dirección de las fisuras es acorde a la encontrada en los ensayos. Sin embargo, el modelo no consigue el desarrollo de la grieta hasta el final, como sí ocurría con material isotropo [9], ya que para estados más o menos avanzados de abertura de fisura, dependiendo de la orientación, se acaba produciendo bloqueo de tensiones.

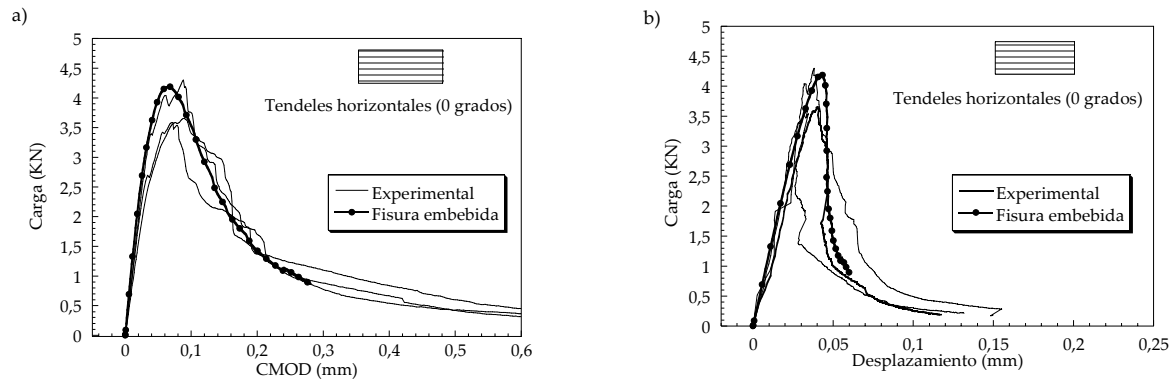


**Fig. 4.** Deformación de la malla de elementos finitos utilizada en la simulación del ensayo con los tendeles: a) a 0 grados; b) inclinados a 45 grados; c) inclinados a 90 grados y, d) inclinados a -45 grados.

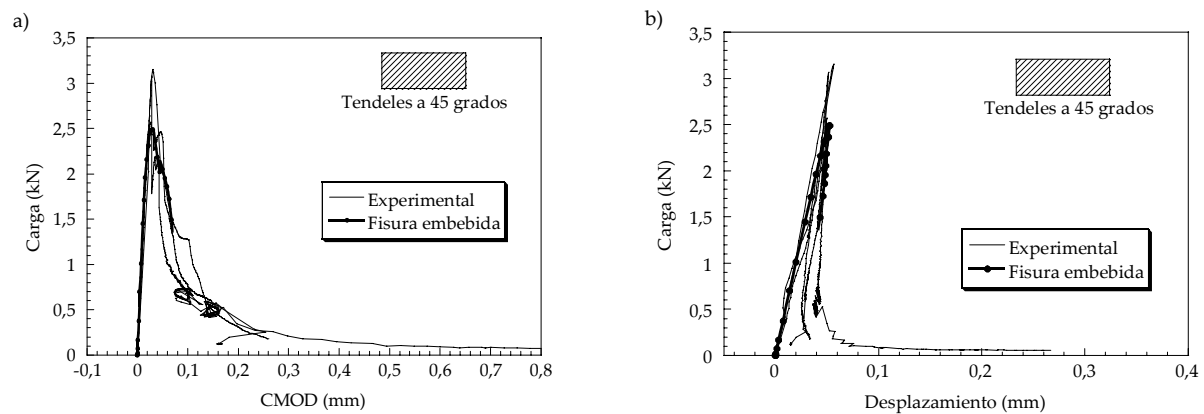
En las Fig. 5, 6, 7 y 8 se comparan los resultados obtenidos de la simulación numérica con los registros experimentales carga aplicada-desplazamiento y carga aplicada-CMOD, para las distintas inclinaciones de los tendeles. El modelo reproduce adecuadamente la carga máxima, y en todos los casos representa correctamente el comportamiento no lineal de la primera parte de la rama post-pico. En algunos casos el bloqueo de tensiones impide que el modelo reproduzca de forma completa la rama post-pico.

## 6. COMENTARIOS FINALES

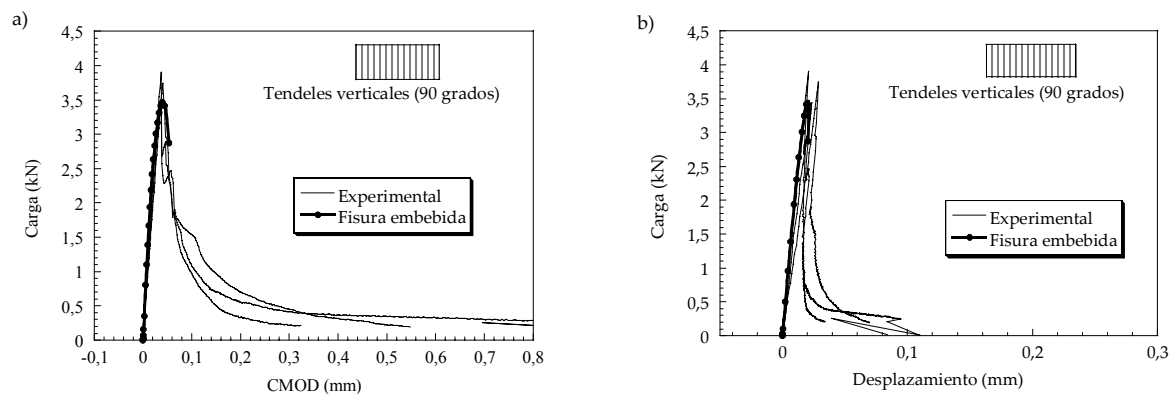
Se ha presentado un modelo de fisura cohesiva embebida en un elemento finito para materiales anisótropos. El modelo incorpora parámetros del material mensurables experimentalmente mediante ensayos normalizados.



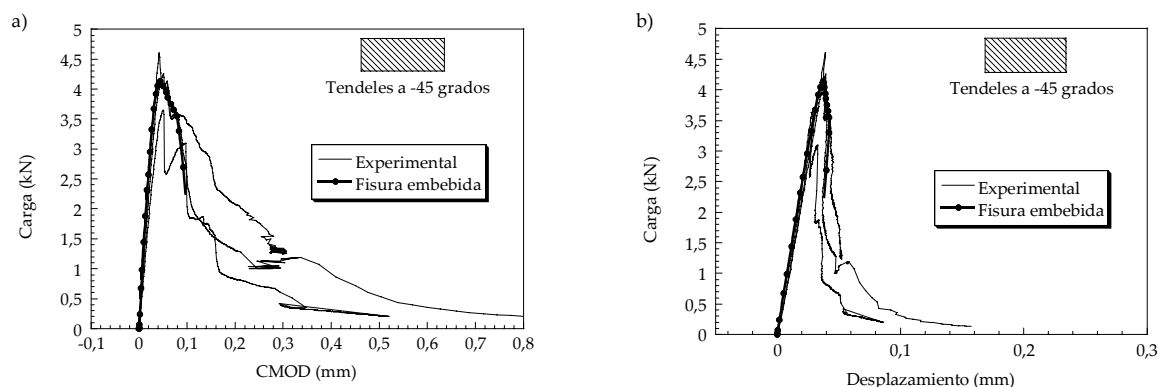
**Fig. 5.** Resultados experimentales y predicción numérica de los ensayos con las probetas de fábrica con los tendeles a 0 grados: a) carga aplicada frente a CMOD, b) carga aplicada frente a desplazamiento.



**Fig. 6.** Resultados experimentales y predicción numérica de los ensayos con las probetas de fábrica con los tendeles a 45 grados: a) carga aplicada frente a CMOD, b) carga aplicada frente a desplazamiento.



**Fig. 7.** Resultados experimentales y predicción numérica de los ensayos con las probetas de fábrica con los tendeles a 90 grados: a) carga aplicada frente a CMOD, b) carga aplicada frente a desplazamiento.



**Fig. 8.** Resultados experimentales y predicción numérica de los ensayos con las probetas de fábrica con los tendeles a -45 grados: a) carga aplicada frente a CMOD, b) carga aplicada frente a desplazamiento.

Los parámetros de fractura incorporados corresponden al modo I, para dos direcciones representativas del material, y con ellos se predice de forma razonable la rotura por tracción y cortante de la fábrica de ladrillo.

El modelo propuesto se ha incorporado en un elemento finito triangular de deformación constante que ha sido incorporado al código de elementos finitos ABAQUS®, mediante una subrutina de usuario. La formulación presentada traza el camino de fisura de forma automática, sin hacer uso de algoritmos que fuercen la continuidad de la grieta (*tracking*), ni la utilización de zonas de exclusión.

El modelo desarrollado se ha empleado para simular los resultados experimentales de los ensayos de rotura por tracción y cortante de fábrica de ladrillo a escala 1/4 [1, 3 y 7]. El modelo predice los resultados experimentales de forma razonable, si bien para material anisótropo la pequeña adaptabilidad introducida en el elemento no ha sido suficiente para evitar el bloqueo de tensiones. Este problema se ha presentado en todos los casos en estados más o menos avanzados del cálculo, dependiendo de la orientación de la fábrica en el ensayo simulado.

Estos resultados resultan prometedores para continuar en el estudio de la utilización de modelos de fisura cohesiva embebida. La utilización de esta aproximación representa una alternativa sencilla que puede ser considerada 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] Gálvez, J., Reyes, E. and Casati, M.J. "Brickwork masonry failure under tensile/shear loading", Proc. 6<sup>th</sup> Int. Masonry Conference, London, England, pp. 184-191, British Masonry Society, (2002).
- [2] Lofti, H.R. y Shing, P.B., "Interface model applied to fracture of masonry structures", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, N° 1, pp. 63-80 (1994).
- [3] Reyes, E., "Rotura de la fábrica de ladrillo bajo solicitaciones de tracción y cortante", Tesis Doctoral, Universidad de Castilla La Mancha, (2004).
- [4] 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 la Mecánica de la Fractura, 21, (en imprenta), (2004).
- [5] Page, A.W. "The strength of brick masonry under biaxial tension-compression", Int. J. of Masonry Construction, 3, 26-31, (1983).
- [6] Lourenço, P.B. y Rots, J., "Multisurface interface model for analysis of masonry structures", Journal Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, N° 7, pp. 660-668 (1997).
- [7] Reyes, E., Casati, M.J. y Gálvez, J.. "Estudio de la rotura de la fábrica de ladrillo bajo solicitaciones de tracción y cortante", Hormigón y Acero, (2003).
- [8] Lourenço, P.B., "Anisotropic softening model for masonry plates and shells", Journal Structural Engineering, ASCE, Vol. 126, N° 9, pp. 1008-1016 (2000).
- [9] Reyes, E., Cendón, D.A., Sancho, J.M., Planas, J. y Gálvez, J.C., "Un modelo de fisuración del hormigón en modo mixto mediante fisura cohesiva embebida: contrastación experimental", Anales de la Mecánica de la Fractura, 21, (en imprenta), (2004).