ROTURA DE PROBETAS DE FÁBRICA DE LADRILLO A ESCALA BAJO TENSIONES NORMALES Y TANGENCIALES

E. Reyes, M.J. Casati y J.C. Gálvez

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla La Mancha, Av. Camilo José Cela, s/n, 13071 Ciudad Real, e-mail : Jaime.Galvez@uclm.es

Resumen. El conocimiento de la rotura de la fábrica de ladrillo bajo acciones combinadas de tracción y cortante es insuficiente. En el campo experimental los ensayos realizados se centran en los mecanismos de fallo por compresión, y compresión y cortante. En el terreno de la simulación numérica tampoco hay modelos fiables que se puedan aplicar ingenierilmente. Este trabajo presenta los resultados de una campaña experimental encaminada a proporcionar datos experimentales sobre la rotura de la fábrica de ladrillo bajo solicitaciones de tracción y cortante. Con este fin se han ensayado vigas de flexión en tres puntos con entalla asimétrica. Los ensayos se han realizado con probetas con cuatro orientaciones de las hiladas (0, 90, 45 y -45 grados) respecto al plano de la entalla y dos tamaños de viga semejantes (razón de semejanza 2). Los resultados constituyen un banco de pruebas útil para comprobar y validar modelos de cálculo de fractura de fábrica de ladrillo. Los resultados experimentales se simulan con un modelo de fractura para fábrica de ladrillo desarrollado por los autores y se obtiene una predicción adecuada.

Abstract. The research on the failure of the brickwork masonry under tensile/shear loading calls for a detailed experimental testing and numerical modelling development. On the experimental field the effort was devoted to the failure of the masonry under compression and compression/shear loading. There are not numerical and analytical models for the brickwork failure easy to apply by the practitioners. This work is a summary of an experimental benchmark made to study the mixed mode fracture of the brickwork masonry. The Three Point Bending (TPB) notched beam geometry was adopted for testing. The tests were performed for two similar specimen sizes (similarity ratio is 2) and four different angles between the plane of the notch and the bed joints (0, 90, 45 and -45 degrees) to take into account the anisotropy of the brickwork masonry. A numerical model for brickwork masonry fracture was used to model the experimental results. Numerical results agree quite well with the experimental sets of mixed mode fracture of masonry beams.

1. INTRODUCCIÓN

La fábrica de ladrillo es un material que exhibe en rotura un comportamiento casi-frágil. A diferencia del hormigón, que es otro material casi-frágil mucho mejor conocido, la fábrica de ladrillo presenta un comportamiento anisótropo y no homogéneo. Sus propiedades en fractura dependen mucho de las de sus materiales constituyentes (ladrillo y mortero), y de la dirección de la grieta o grietas con respecto a la orientación de los tendeles. Como se ha puesto de manifiesto [1-4] apenas hay resultados experimentales de fractura en modo mixto de fábrica de ladrillo.

Este trabajo presenta los resultados de una campaña experimental para estudiar la fractura en modo mixto I/II de fábrica de ladrillo. Los ensayos se han realizado con probetas de fábrica de ladrillo a escala. Se han ensayado probetas entalladas mediante flexión en tres puntos, con una geometría empleada por los autores para la fractura en modo mixto de hormigones y morteros. Este trabajo complementa otros resultados presentados por los autores en los que se estudió la fractura en modo mixto con otra geometría [3-4].

El trabajo comienza con la descripción de las probetas y los ensayos. A continuación se presentan los resultados experimentales. Se hace una breve descripción del modelo de cálculo y se comparan sus predicciones con los resultados experimentales. El trabajo concluye con unos comentarios finales.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS PROBETAS

Las probetas reproducen a escala ¼ un muro de fábrica de ladrillo a soga de medio pie de espesor. Se han fabricado a partir de ladrillos macizos comerciales cortados individualmente con una sierra circular por vía húmeda. La granulometría y tamaño de los áridos empleados en el mortero reproducen a escala ¼ el mortero empleado para fabricar este tipo de muros. Los detalles del procedimiento de confección de las probetas se pueden consultar en [3-4].

Se confeccionaron probetas prismáticas de dos tamaños similares, con razón de similitud 2. Las dimensiones fueron 150 x 675 x 31.5 mm y 75 x 337.5 x 31.5 mm respectivamente. De cada tamaño se ensaya-

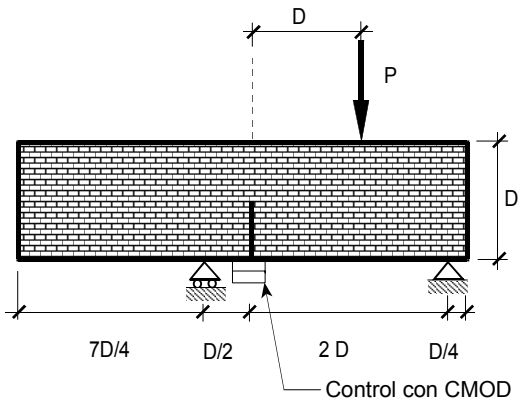


Fig. 1. Geometría de las probetas y disposición de los ensayos.

ron válidamente 3 probetas para cada una de las 4 orientaciones de los tendeles: 0, 90, 45 y -45 grados. En las probetas se realizó una entalla de profundidad la mitad del canto de la probeta (0.5 *D*), situada en la sección central de la probeta. La entalla resultante tenía un espesor de 3.8 mm, con la punta en forma rectangular. Con el fin de evitar diferencias entre ensayos, la punta de la entalla se situó dentro de un ladrillo. Las superficies de la probeta en la que se situaron los rodillos de apoyo y aplicación de la carga fueron rectificadas mecánicamente. La Figura 1 muestra la geometría de las probetas y la disposición del ensayo.

La Tabla 1 muestra las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes, y la Tabla 2 las propiedades de la fábrica de ladrillo para las distintas orientaciones de los tendeles.

3. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1. Dispositivo experimental

Los ensayos se llevaron a cabo con una máquina hidráulica servocontrolada. La carga aplicada se midió con células de carga de 5 y 25 kN, con un error inferior al 0.1 % del fondo de escala.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales y la junta entre ladrillo y mortero.

Elemento	G_F (N/m)	f_t (MPa)
Ladrillo	106	7.6
Mortero	108	6.3
Junta	8	-

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la fábrica.

Orientación	G_F (N/m)	f_t (MPa)	E (GPa)
horizontal	75	5.8	38
45 º	54	4.1	28
vertical	33	2.4	18

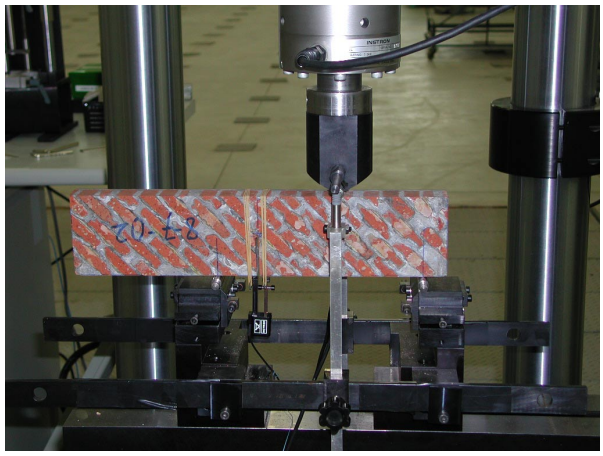


Fig. 2. Probeta pequeña con los tendeles a -45 grados durante un ensayo.



Fig. 3. Grieta en una probeta de tamaño grande con los tendeles a 0 grados al finalizar el ensayo.

Las probetas se instrumentaron con tres extensómetros, dos situados en posición vertical a ambos lados de la probeta para medir el desplazamiento del punto de aplicación de carga, obteniéndose la media, y el tercero para medir la apertura de la boca de la entalla (CMOD). El rango de medida de los tres extensómetros fue de $\pm$ 2.5 mm, con un error inferior al 0.1 % del fondo de escala.

3.2. Procedimiento de ensayo de las probetas

Los ensayos se realizaron con control de CMOD a una velocidad de 0.04 mm/min. hasta el 80% de la carga máxima y 0.08 mm/min. desde ese instante hasta el final del ensayo. La Figura 2 muestra una foto de una probeta de tamaño pequeño con los tendeles a –45 grados durante uno de los ensayos.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Grietas en los muros

La Figura 3 muestra la grieta en una probeta grande con los tendeles a 0 grados al finalizar un ensayo.

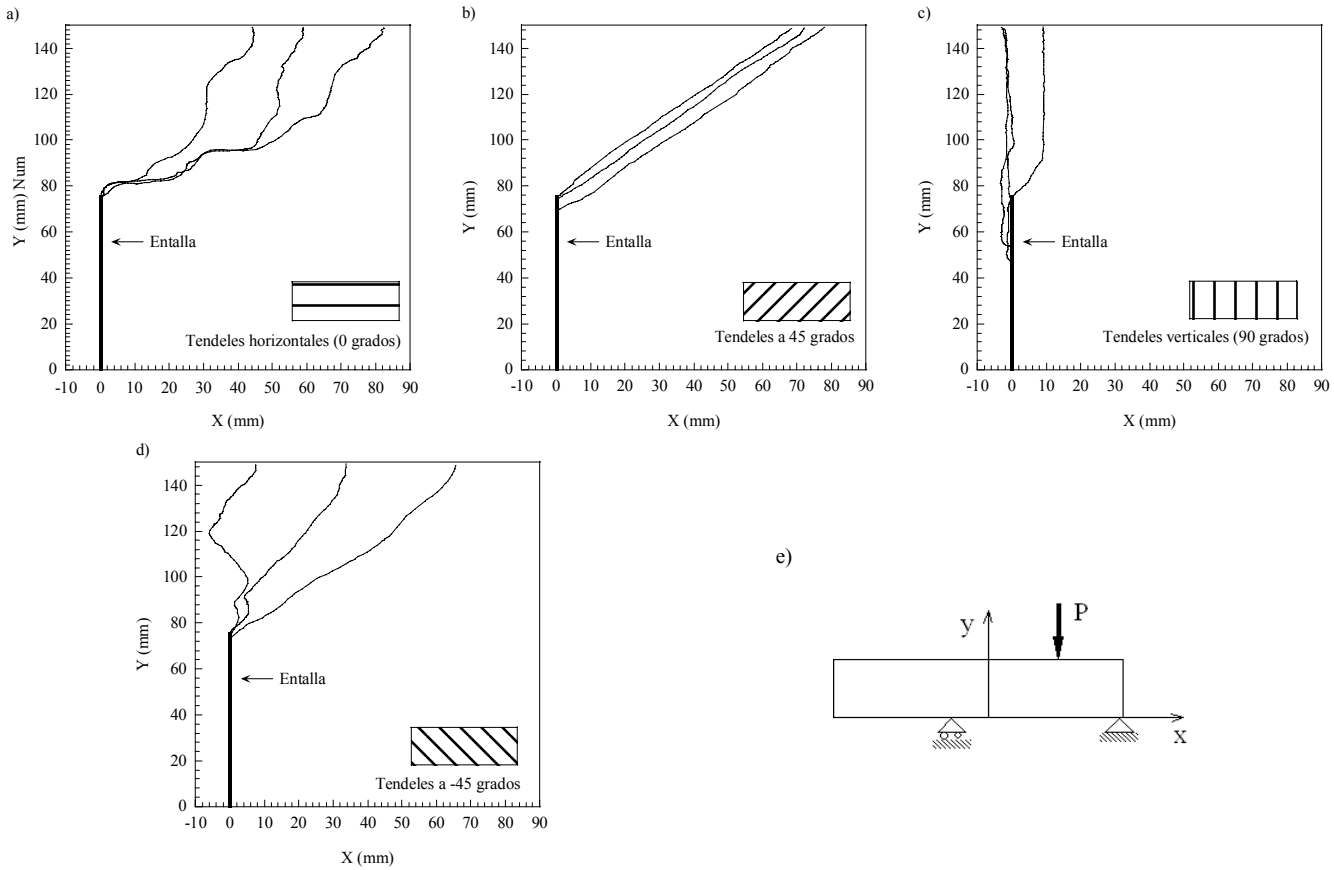


Fig. 4. Trayectorias experimentales de las grietas en las probetas grandes (D = 150 mm) con distintas inclinaciones de los tendeles: a) 0 grados, b) 45 grados, c) 90 grados, d) –45 grados, e) ejes de referencia adoptados.

La Figura 4 muestra las trayectorias experimentales de las grietas en las probetas grandes (D = 150 mm). En todos los casos se aprecia una dispersión experimental pequeña, si se tiene en cuenta la gran dispersión experimental que suele mostrar la fábrica [1-3]. Casi todos los ensayos muestran la debilidad de la intercara ladrillo-mortero. En las probetas con los tendeles horizontales (0 grados) la grieta tiende a propagarse escalonadamente siguiendo las juntas ladrillo mortero (Figura 4a). En las probetas con los tendeles a 45 grados las grietas se propagaron por la junta entre ladrillo y mortero, formando una línea recta a 45 grados con la horizontal (Figura 4b). En las probetas con los tendeles verticales (90 grados), las grietas se propagaron buscando la dirección vertical siguiendo las juntas entre ladrillo y mortero (Figura 4c). Finalmente las probetas con los tendeles a –45 grados mostraron una mayor dispersión en el trayectoria de la grietas, éstas buscaban una trayectoria inclinada hacia el punto de aplicación de la carga, pero los planos más débiles se situaban en una dirección casi perpendicular, esta razón justifica la inusual trayectoria presentada por una de las grietas (Figura 4d). Similares trayectorias fueron observadas en las probetas pequeñas (D = 75 mm) ensayadas.

4.2. Registros experimentales carga-desplazamiento y carga-CMOD

Las Figuras 5 y 6 muestran los registros experimentales carga-CMOD de las probetas de fábrica para los dos tamaños y las cuatro orientaciones de los tendeles. En todos los casos los resultados son repetitivos y muestran poca dispersión experimental.

Para ambos tamaños la fábrica muestra la menor resistencia cuando la grieta se propaga por la junta entre ladrillo y mortero, que con la geometría de probeta ensayada corresponde a la orientación de 45 grados de los tendeles. La resistencia más alta corresponde a la propagación de la grieta cortando los ladrillos, que en nuestro caso corresponde a la orientación de –45 grados de los tendeles. Este resultado pone de manifiesto que las juntas entre ladrillo y mortero constituyen el elemento más débil de fábrica frente a la fractura.

5. MODELO DE CÁLCULO

5.1. Trayectoria de las grietas

En trabajos anteriores [3-5] se ha mostrado que la predicción de la trayectoria proporcionada por la mecánica de la fractura elástica lineal constituye una buena aproximación de la trayectoria de la grieta en

materiales cuasifrágiles. En este trabajo se emplea el criterio de la *máxima tensión tangencial*, enunciado por Erdogan y Sih [6], que postula que la grieta crece radialmente a la punta de la grieta en la dirección normal a la máxima tensión $\sigma_{\theta\theta}$. Para el cálculo de las trayectorias de grieta se empleó el código de elementos finitos FRANC2D [7].

Se ha observado que la predicción numérica simula bien el inicio de las trayectorias, pero no capta adecuadamente su camino una vez que éstas se propagan siguiendo las juntas entre mortero y ladrillo.

5.2. Modelo de cálculo

Para simular el comportamiento en rotura de la fábrica empleamos el modelo de fractura presentado en trabajos anteriores [3-4]. Se trata de un modelo basado en una superficie de rotura expresada mediante la ecuación de una hipérbola:

$$F(\mathbf{t}) = \tau^2 - \tan\phi_f\left(f_t(\theta) - \sigma\right)\left[2c(\theta) - \tan\phi_f\left(f_t(\theta) + \sigma\right)\right]$$

donde $c(\theta)$, ϕ_f y $f_t(\theta)$ son los valores instantáneos de la cohesión, el ángulo de fricción y la resistencia a tracción, respectivamente. Estos valores dependen de la dirección del material, θ, y de la historia de carga a través de la norma de los desplazamientos de la grieta.

La Figura 7 comparan los registros experimentales carga-CMOD con la predicción realizada con el modelo numérico para las probetas de tamaño grande (D = 150 mm). En todos los casos se observa que el modelo predice satisfactoriamente los resultados experimentales.

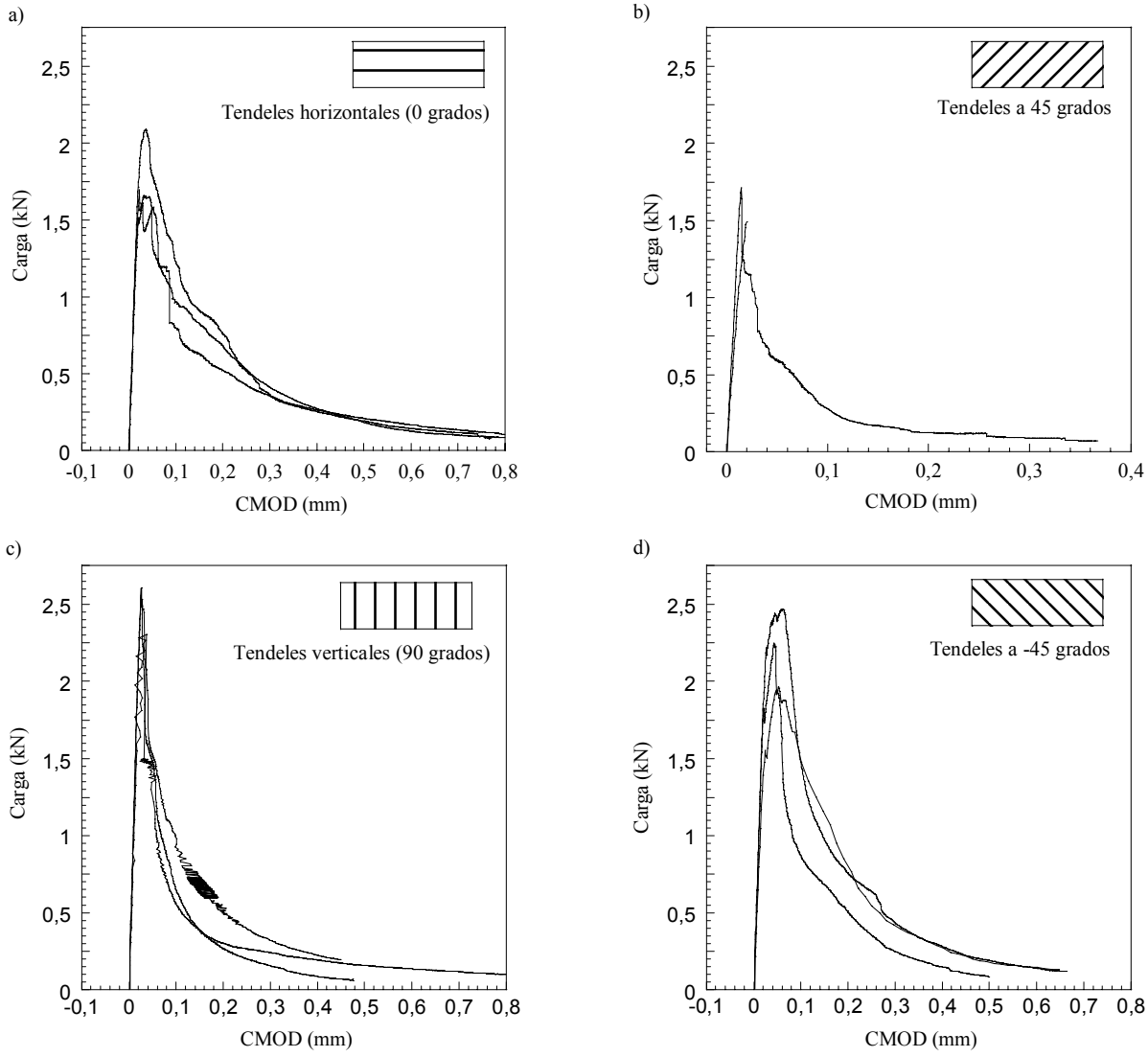


Fig. 5. Registros experimentales de la carga aplicada frente al CMOD en las probetas pequeñas (D = 75 mm) con distintas inclinaciones de los tendeles: a) 0 grados, b) 45 grados, c) 90 grados, y d) –45 grados.

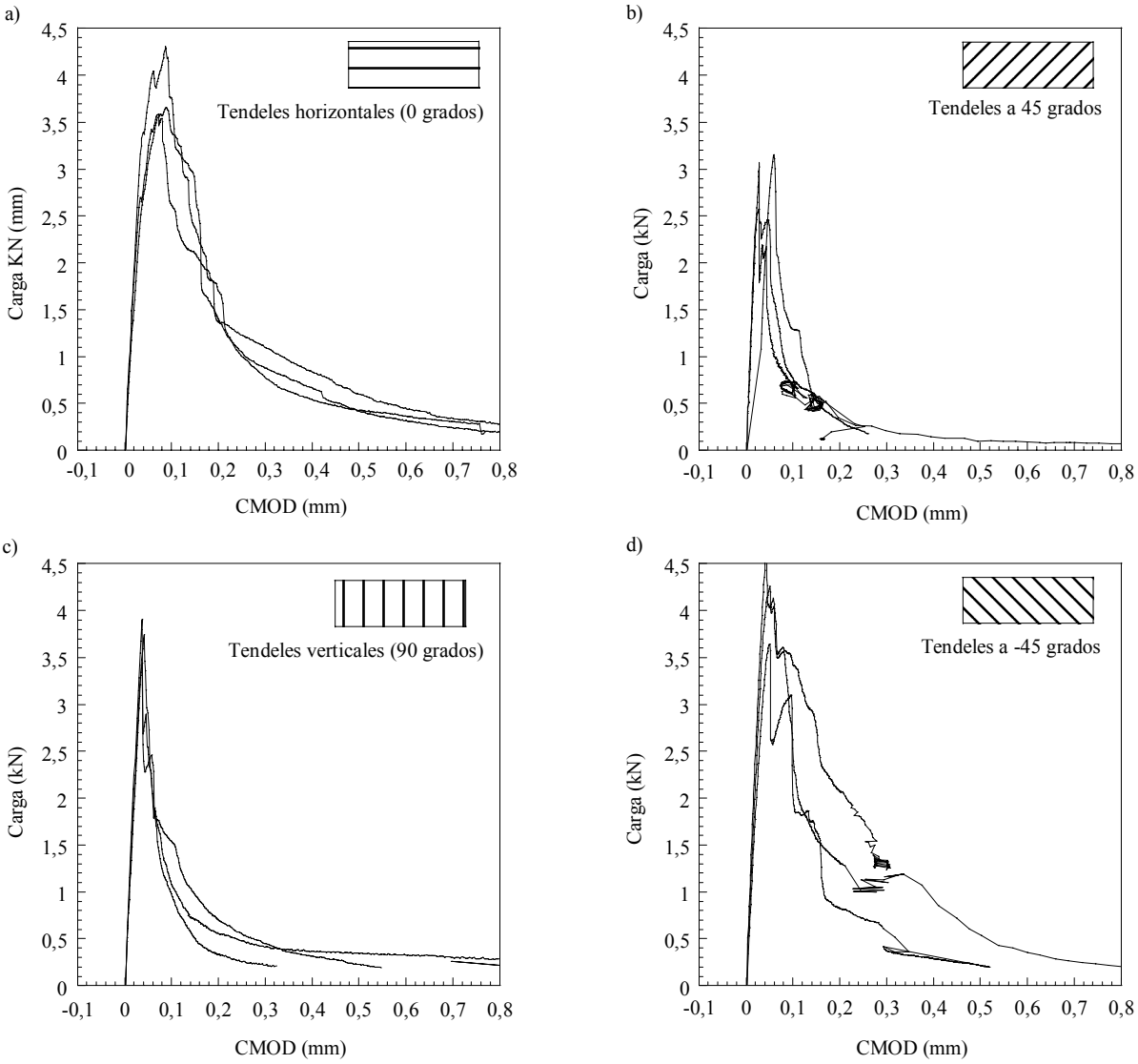


Fig. 6. Registros experimentales de la carga aplicada frente al CMOD en las probetas grandes (D = 150 mm) con distintas inclinaciones de los tendeles: a) 0 grados, b) 45 grados, c) 90 grados, y d) –45 grados.

6. COMENTARIOS FINALES

Los resultados de los ensayos realizados con probetas de fábrica de ladrillo e hiladas con cuatro orientaciones distintas han puesto de manifiesto la fuerte dependencia que tienen las propiedades mecánicas de la fábrica respecto a la orientación de sus tendeles. Además se ha observado la dependencia de los resultados de los ensayos con relación al mecanismo de rotura de la fábrica: según que las grietas se propagasen por las intercaras ladrillo-mortero, o atravesasen el ladrillo y el mortero. En las probetas ensayadas las grietas han tendido a propagarse a través de la intercara ladrillo-mortero, lo que apunta a que se trata del camino más débil. Esta hipótesis se debe complementar con la medida experimental de la energía de adhesión ladrillo-mortero y su comparación con la energía de fractura del ladrillo y el mortero por separado.

Además, se ha empleado un modelo [3-4] para simular los ensayos realizados de rotura bajo tensiones normales y tangenciales combinadas (fractura en modo mixto) de la fábrica de ladrillo, obteniéndose un buen ajuste para las distintas inclinaciones de los tendeles.

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 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.

REFERENCIAS

[1] Lorenço, P.J., "Computational strategies for masonry structures", Ph.D. Thesis, 211 pp., Delft, Holanda (1996).

[2] Lorenço, P.J., Rots, J. and Blaauwendraad, J. "Continuum model for masonry: parameter estimation and validation", J. Struct. Eng., ASCE, 124, 642-652, (1986).

[3] Reyes, E., Casati, M.J. y Gálvez, J.. "Estudio de la rotura de la fábrica de ladrillo bajo solicita-ciones de tracción y cortante", Hormigón y Acero, (aceptado), (2003).

[4] Gálvez, J., Reyes, E. and Casati, M.J. "Brickwork masonry failure under tensile/shear loading", Proc. 6th Int. Masonry Conference, London, England, pp. 184-191, British Masonry Society, (2002).

[5] Cendón, D.A., Gálvez, J.C., Elices, M. y Planas, J., "Modelling the fracture of concrete under mixed loading ", Int. J. of Fracture, 103, 293-310, (2000).

[6] Erdogan, F. y Sih, G.C., "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear", J. of Basic Engineering, 85, 519-527, (1963).

[7] FRANC2D: A Two-Dimensional Crack Propaga-tion Simulator, Version 2.7, Wawryzynek, P. and Ingraffea, A., (1998).

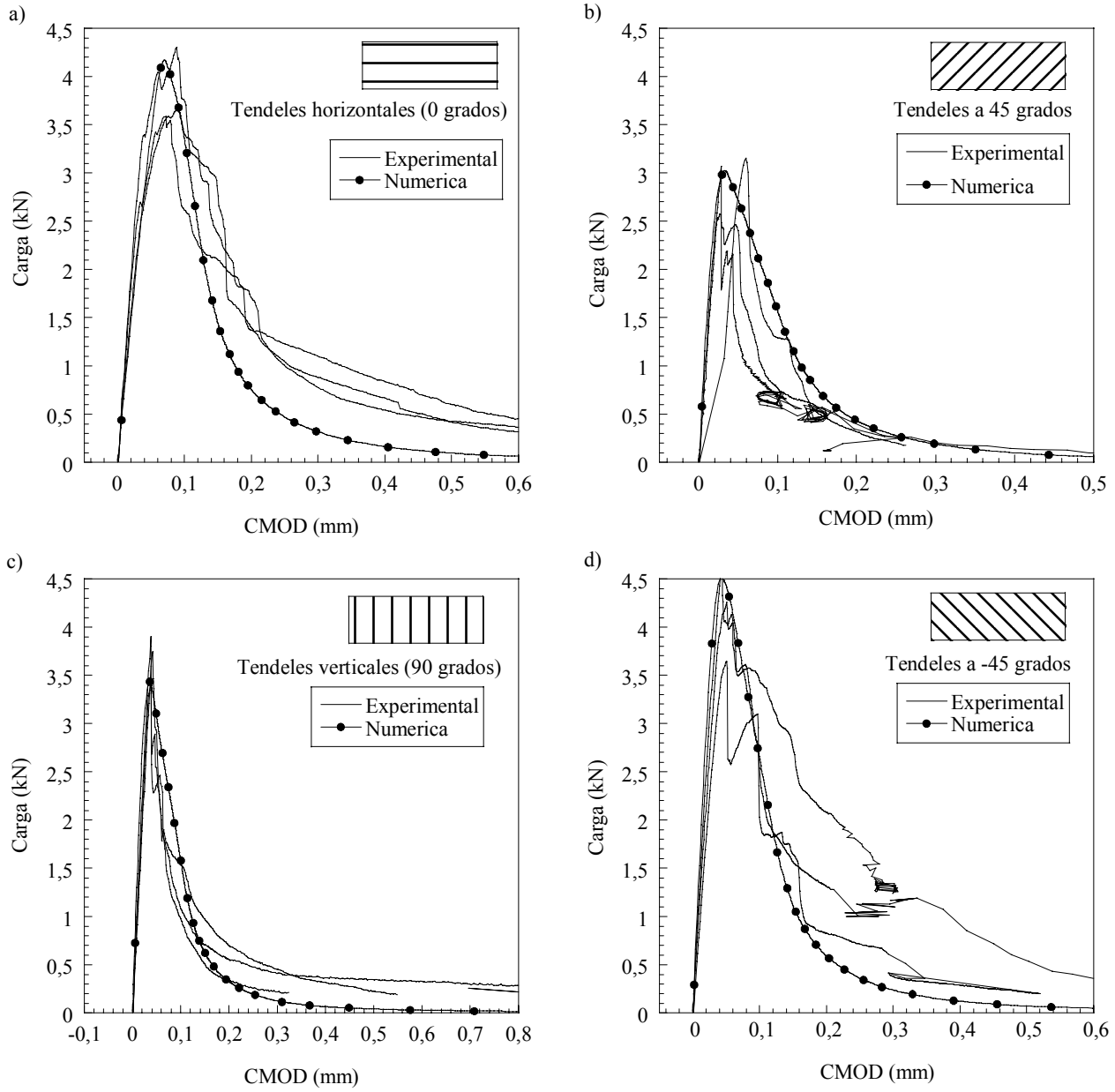


Fig. 7. Registros experimentales y predicción numérica de la carga aplicada frente al CMOD en las probetas grandes (D = 150 mm) con distintas inclinaciones de los tendeles: a) 0 grados, b) 45 grados, c) 90 grados, y d) –45 grados.