

CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS DE LA DILATANCIA Y SU INFLUENCIA EN LA FISURACIÓN EN MODO MIXTO PARA MATERIALES CUASIFRÁGILES

V. O. García Álvarez¹ C. M. López Garello²

¹ E-mail: vgarcia@ciccp.es

² Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona. España
E-mail: carlos.maria.lopez@upc.edu

RESUMEN

En los materiales heterogéneos como el hormigón el camino de fisuración presenta irregularidades y ramificaciones, de modo que desplazamientos relativos tangenciales producen un acoplamiento de las tensiones normales y de corte, acompañado de una separación de las caras de fisura (efecto de dilatación). El problema del modo mixto de fractura se puede abordar de una forma consistente mediante elementos junta de espesor nulo en un análisis numérico mediante el método de los elementos finitos. Las leyes constitutivas de estos elementos junta permiten un acoplamiento de los efectos normal/corte e incorporan conceptos de la mecánica de fractura. En este artículo, continuación del trabajo presentado en el XXII Encuentro del Grupo Español de Fractura, se estudia el fenómeno de la dilatación teniendo en cuenta su incidencia tanto en la regla de flujo como en la definición del trabajo consumido en el proceso de fractura. Se analiza la influencia de la dilatación cuando se impone una relación fija de desplazamientos relativos de apertura y de corte en una fisura en desarrollo, y se presentan resultados de la simulación numérica de los ensayos experimentales llevados a cabo por Hassanzadeh (1990).

ABSTRACT

In heterogeneous materials like concrete crack path presents irregularities, so that relative sliding between crack faces make a coupling between normal and shear stresses, with a opening of crack (dilatancy effect). Mixed mode crack problem can be approached consistently using interface elements with zero thickness by means of finite element method. Constitutive laws of these interface elements are based on Fracture Mechanics and they allow a coupling of normal/shear effect. In this contribution, which is a continuation of the contribution presented in the XXII Encuentro del Grupo Español de Fractura, dilatancy effect is studied taking into account its influence not only in the "flow rule", but also in the definition of work wasted away by the fracture process. Dilatancy influence is analyzed when a fix relation between crack opening and crack sliding is imposed, and results of a numerical simulation of tests made by Hassanzadeh (1990) are shown.

ÁREAS TEMÁTICAS PROPUESTAS: Métodos Analíticos y Numéricos o Fractura de materiales compuestos.

PALABRAS CLAVE: Modo mixto de Fractura, Dilatación, Material cuasifrágil.

1. INTRODUCCIÓN

Los ensayos experimentales llevados a cabo en materiales cuasifrágiles en modo mixto de fractura ponen de manifiesto la importante influencia del efecto de la dilatación [1,2]. En [1] se han utilizado probetas prismáticas de hormigón de 6 cm de altura y con base cuadrada de 7 cm de lado, que presentan en la mitad de la altura una entalla perimetral de 1.5 cm de ancho. Durante la primera parte del ensayo, la muestra está sometida a tracción pura hasta que se alcanza el pico de tensiones normales y una fisura en Modo I comienza a formarse a través de la sección transversal reducida. A partir de este punto, se aplican simultáneamente desplazamientos relativos de apertura (normal) y de corte en una proporción fija caracterizada por el ángulo $\tan \gamma = \omega_h^{cr} / \omega_n^{cr}$. En la figura 1 (a) y (b) se reproducen

los gráficos presentados en [1] para valores de $\gamma = 30^\circ$, 60° y 75° . Los resultados muestran un comportamiento complejo de la evolución de las tensiones, que varían de tracción/corte a compresión/corte. Este comportamiento resulta más acentuado en la medida en que el desplazamiento relativo de corte que se impone resulta mayor y puede atribuirse a la dilatación generada por la heterogeneidad del material cuyo desarrollo normal se ve impedido por una relación de desplazamientos impuestos menor. En la figura 1 (c) y (d) se muestran resultados experimentales similares obtenidos en [2].

Una forma consistente de abordar el problema del modo mixto de fractura en materiales cuasifrágiles es mediante el enfoque de la fisuración discreta con elementos junta sin espesor que representan el comportamiento de las discontinuidades y la fisuración. Las leyes constitutivas

de estos elementos junta permiten un acoplamiento de los efectos normal/corte e incorporan conceptos de la mecánica de fractura. En un trabajo previo [3], se ha empleado un modelo de fisura cohesiva en modo mixto para analizar el fenómeno de dilatación en la fractura de materiales cuasifrágiles. El modelo tiene en cuenta la

incidencia de la dilatación no sólo en la regla de flujo, sino también en la definición del trabajo consumido en el proceso de fractura. En este trabajo se continúa el estudio anterior y se presentan resultados de la simulación numérica de los ensayos experimentales llevados a cabo por Hassanzadeh [1].

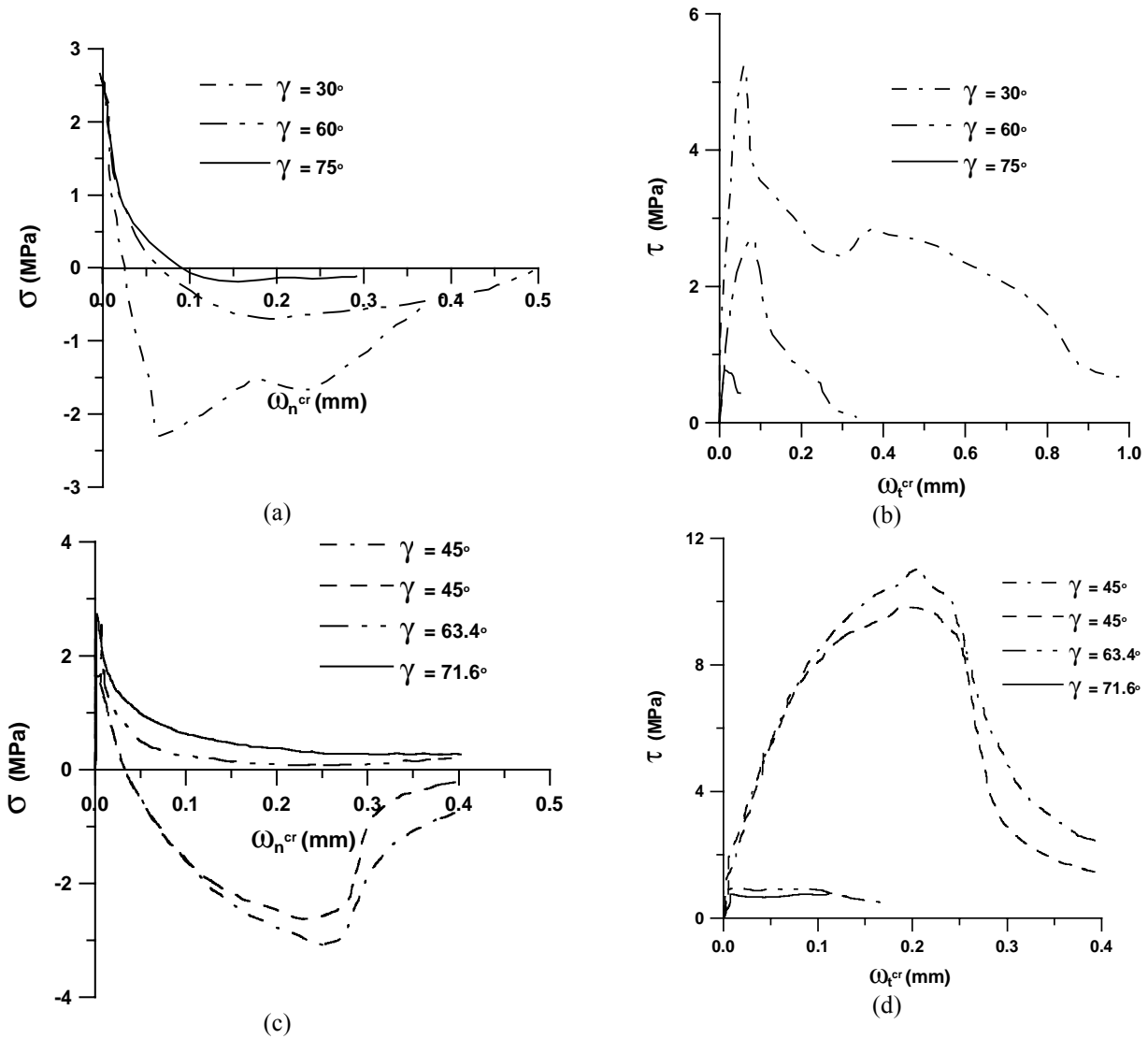


Figura 1. Resultados experimentales obtenidos en [1] (superior) y [2] (inferior): (a) y (c) curvas apertura de fisura-tensión normal, (b) y (d) deslizamiento tangencial – tensión tangencial.

2. MODELO CONSTITUTIVO

2.1. Formulación del modelo

Como ya se ha comentado, el problema del modo mixto de fractura se puede abordar convenientemente mediante elementos junta sin espesor, que permiten integrar y extender de un modo natural el “fictitious crack model” (modelo de la fisura ficticia) de Hillerborg [4] en un análisis numérico mediante el método de los elementos finitos. El comportamiento se formula en

términos de la componente normal y tangencial de las tensiones en el plano medio de la junta y los desplazamientos relativos correspondientes. El criterio de fractura F se define mediante una hipérbola de tres parámetros (figura 2) que puede expresarse como [5,6]:

$$F = \tau^2 + \tan^2 \phi (\sigma - \chi)(2a - \sigma + \chi) = 0 \quad (1)$$

donde σ y τ son la tensión normal y de corte, χ es la

resistencia a tracción, $\tan\phi$ es el ángulo de fricción entre las caras de la fisura y el parámetro a representa la distancia horizontal entre el vértice de la hipérbola y sus asíntotas (alternativamente, suele emplearse el parámetro c , ordenada en el origen de las asíntotas, que representa la cohesión aparente).

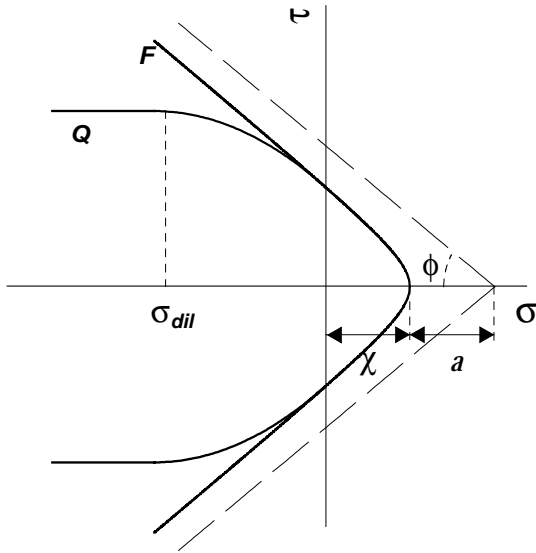


Figura 2. Superficie de fractura y potencial plástico.

Una vez iniciada la fisuración, la superficie de fractura se contrae mediante el decrecimiento de los parámetros χ y a de la hipérbola. La evolución de estos parámetros depende de la energía disipada (W^{cr}) durante la propagación de la fisura, que se puede descomponer en las energías disipadas en modo I y en modo II, cuyas expresiones en modo diferencial son:

$$dW^{cr} = dW_I^{cr} + dW_{II}^{cr} \quad (2)$$

$$dW_I^{cr} = \sigma d\omega_n^{cr} \quad \text{si } \sigma \geq 0; \quad dW_I^{cr} = 0 \quad \text{si } \sigma < 0 \quad (3)$$

$$dW_{II}^{cr} = \tau d\omega_t^{cr} \quad \text{si } \sigma \geq 0 \quad (4)$$

donde $d\omega_n^{cr}$ y $d\omega_t^{cr}$ representan el incremento de desplazamientos relativos de apertura de fisura en la dirección normal y tangencial, respectivamente. Para la componente en modo II en compresión se van a analizar las siguientes tres alternativas:

$$dW_{II}^{cr} = (|\tau| - |\sigma| \tan\phi) |d\omega_t^{cr}| \quad \text{si } \sigma < 0 \quad (5)$$

$$dW_{II}^{cr} = (|\tau| - |\sigma| \tan\phi) |d\omega_t^{cr}| - |\sigma| d\omega_n^{cr} \quad \text{si } \sigma < 0 \quad (6)$$

$$dW_{II}^{cr} = \left(|\tau| d\omega_t^{cr} - |\sigma| d\omega_n^{cr} \right) \left(1 - \frac{|\sigma| \tan\phi}{|\tau|} \right) \quad \text{si } \sigma < 0 \quad (7)$$

La ecuación (5) representa la expresión clásica en la que al trabajo de corte se le resta el trabajo de fricción pura [5,7]. Las expresiones (6) y (7) tienen en cuenta también la energía de dilatación, aunque de manera diferente. La expresión (6) [6,8] consiste en restar directamente la energía de dilatación (propuesta 1), mientras que en la ecuación (7) [9], sólo se resta una parte de la energía de dilatación (propuesta 2).

Para controlar el proceso de fractura, el modelo posee dos parámetros que representan las energías de fractura en modo I y II, G_F^I y G_F^{II} . La regla de flujo es asociada en tracción $F = Q$ (Q potencial plástico), aunque no en compresión, donde se define una ley de dilatación para que ésta disminuya progresivamente con el nivel de compresión $\sigma \rightarrow \sigma^{dil}$ (Figura 1) y con la degradación de la junta $a \rightarrow 0$. Se dispone de parámetros adicionales α_χ y α_a que controlan la forma de evolución de las curvas de reblandecimiento, y α_d que controla la evolución de la dilatación en compresión mediante un factor que reduce la componente normal de la regla de flujo. Una descripción mas detallada puede verse en [3,5,6].

2.2. Verificación del modelo

En un artículo del anterior Congreso del Grupo Español de Fractura [3] se ha presentado el comportamiento del modelo en ensayos de corte con confinamiento. En esta sección se analiza el comportamiento en un ensayo consistente en mantener una relación constante entre la apertura de la fisura y el deslizamiento relativo de las caras de la misma, representada por la tangente del ángulo γ (similar a los ensayos experimentales de [1, 2]). Para ello se ha realizado un ensayo constitutivo numérico en el que se han empleado los siguientes parámetros del modelo: $D_n = D_t = 10^2$ MPa/mm (coeficientes elásticos de deformación en dirección normal y tangencial de los elementos junta), $\tan\phi = 0.75$, $\chi_0 = 2.8$ MPa, $a_0 = 10$ MPa, $G_F^I = 0.1$ N/mm, $G_F^{II} = 1.8$ N/mm, $\sigma_{dil} = 30$ MPa, y $\alpha_d = 2$, para los ángulos γ de 10° , 30° y 60° .

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3. En 3 (a) se representan las tensiones normales en función de los desplazamientos relativos normales. Se observa en estas curvas, que al igual que en los ensayos experimentales las tensiones normales caen más rápidamente, cambian de signo, alcanzan un pico de compresión mayor (en términos absolutos) y finalmente tienden a anularse asintóticamente, de manera más pronunciada a medida que se impone una mayor proporción de deslizamiento tangencial (disminución del ángulo γ). En la figura 3 (b), que muestra las tensiones de corte en función de los desplazamientos relativos

tangenciales, se aprecia que las tensiones alcanzan un valor de pico más alto cuando el γ impuesto es menor. También se observa en las figuras la influencia de considerar el efecto de la dilatación dentro del balance energético del proceso de fractura, que se hace más acentuado en la medida que se impone una mayor proporción de deslizamiento tangencial.

En la figura 3(c) se muestra la evolución de la energía disipada en el proceso de fractura en función del deslizamiento tangencial. Se observa que con la disminución del valor de γ , la evolución de la energía disipada presenta un crecimiento más acentuado al comienzo del proceso. Lógicamente, al final del proceso de fractura, en todos los casos se tiende al valor de G_F^{II} .

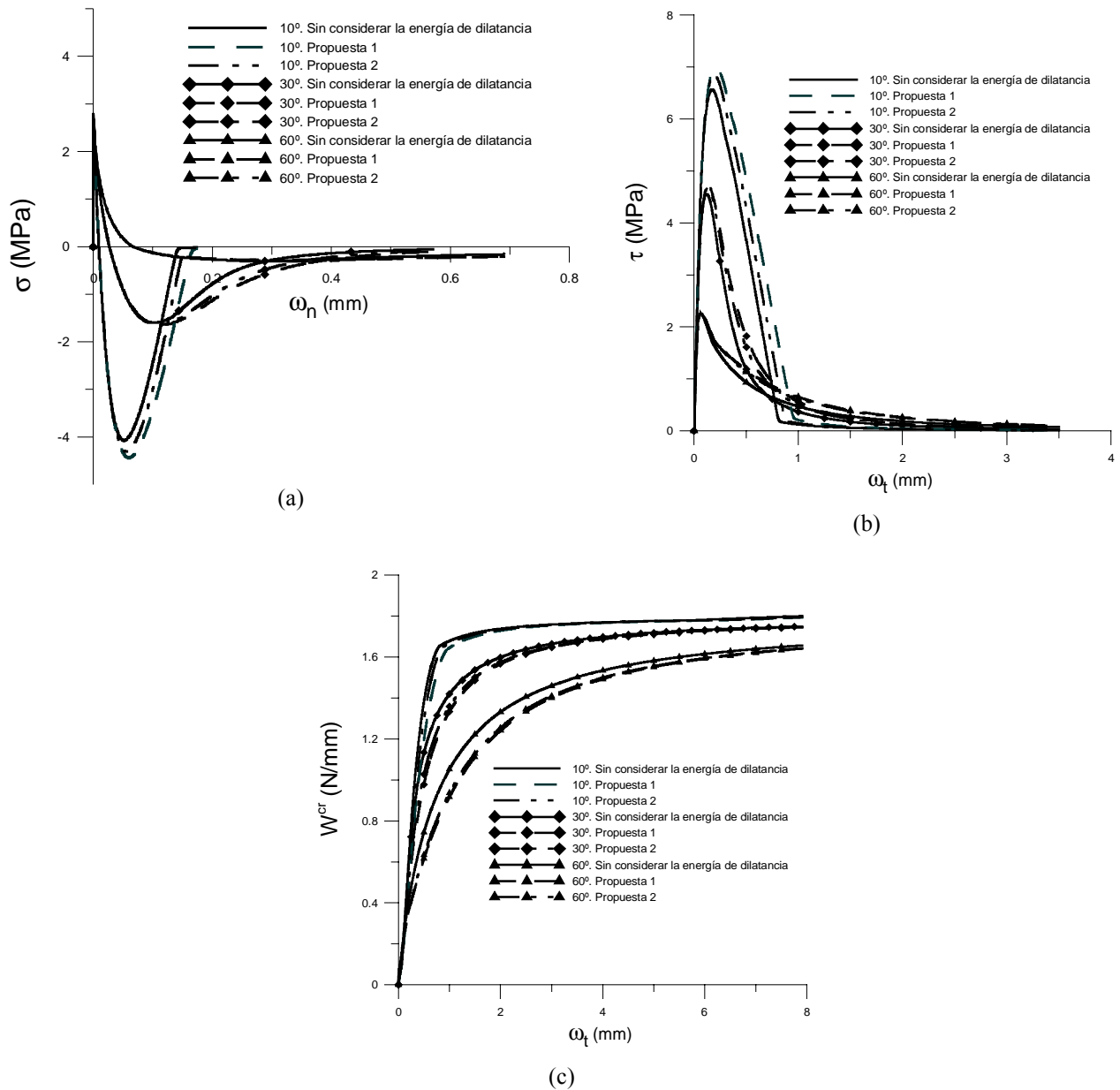


Figura 3. Influencia de la consideración de la dilatación en el balance energético: (a) y (b) curvas apertura – tensión normal y deslizamiento tangencial – tensión tangencial; (c) evolución de la disipación de la energía de fractura con el deslizamiento tangencial.

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

En la figura 4 se muestra un ajuste numérico aproximado obtenido para las curvas experimentales con γ igual a 30° y 60° publicados en [1]. Se han empleado los mismos parámetros que en la simulación anterior.

La observación de los resultados obtenidos da lugar a las siguientes apreciaciones:

1) el modelo constitutivo reproduce adecuadamente el complejo comportamiento experimental observado en

ensayos en los que se impone una relación fija de desplazamientos de apertura y de corte.

2) La consideración de la energía de dilatación tanto para γ igual a 30° como para γ igual a 60° influye de manera considerable en los resultados.

3) La incidencia de incluir la energía de dilatación en el análisis aumenta en la medida que se impone una mayor proporción de deslizamiento de corte. Esto se podría analizar y contrastar de forma más adecuada si se contara con ensayos experimentales para valores de γ menores de 30° .

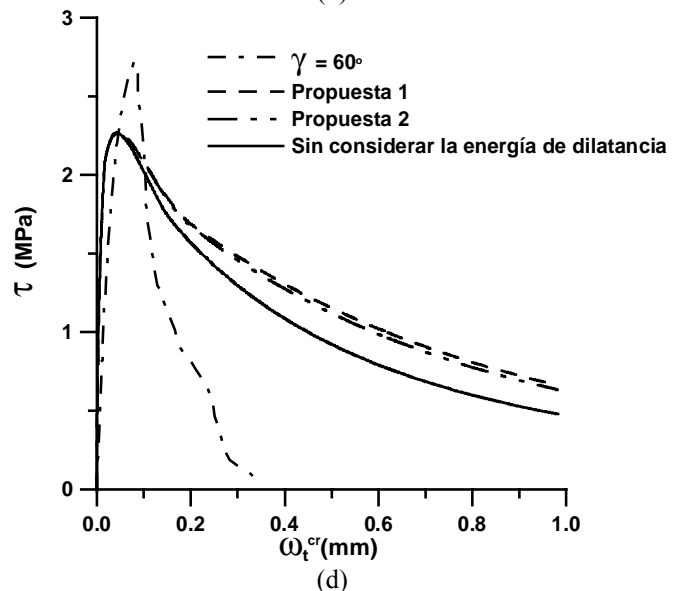
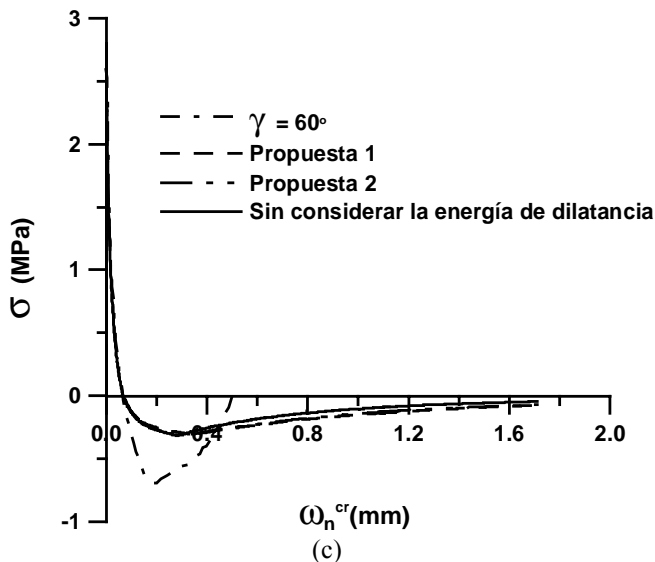
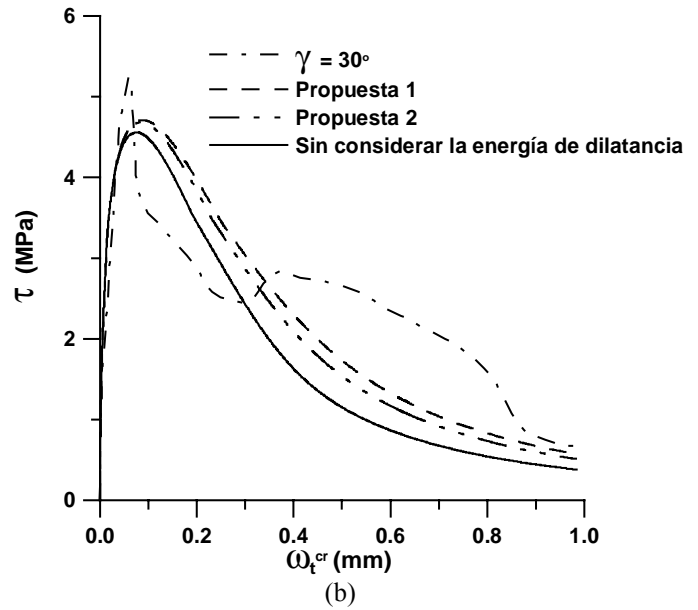
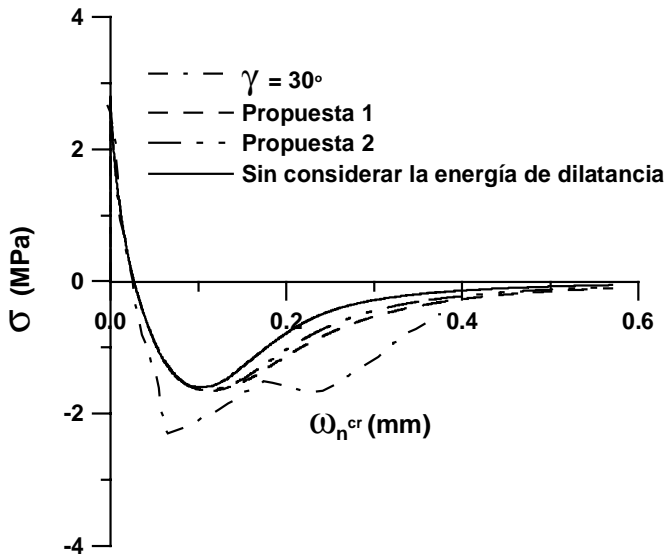


Figura 4. Simulación numérica de los resultados experimentales obtenidos por Hassanzadeh [1]: (a) y (b) γ igual a 30° ; (c) y (d) γ igual a 60° .

4. CONSIDERACIONES FINALES

En este trabajo se ha utilizado un modelo de fisura cohesiva para materiales heterogéneos como el hormigón a fin de analizar el efecto de la dilatación mediante tres propuestas. Por un lado, este efecto se ha tenido en cuenta de una forma más habitual, sólo a través de la “regla de flujo”. Las otras dos alternativas consisten en considerar el efecto también en la expresión del trabajo disipado en fractura (variable de historia del modelo).

Se ha analizado el efecto de la dilatación en un ensayo en modo mixto de fractura llevado a cabo como se propone en [1] y en [2], manteniendo una relación constante a lo largo de todo el ensayo entre la apertura de la fisura y el deslizamiento relativo entre las caras de la misma. Se presenta también la simulación de los ensayos realizados por Hassanzadeh para γ igual a 30° y 60° .

Del análisis numérico y del ajuste de los ensayos experimentales se ha podido apreciar la considerable influencia de incluir la energía de dilatación, en mayor medida cuando aumenta la proporción de la componente de cortante.

AGRADECIMIENTOS

El segundo autor agradece al MEC (Madrid) la incorporación al sistema español de ciencia y tecnología mediante el “Programa Ramón y Cajal”.

REFERENCIAS

- [1] Hassanzadeh, M. “Determination of fracture zone properties in mixed mode I and II”. *Engineering Fracture Mechanics*, 35 (4/5), pp. 845-853 (1990).
- [2] Nooru-Mohamed, M. B. “*Mixed-Mode Fracture of concrete: An experimental approach*”. PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, Holanda (1992).
- [3] García Álvarez, V.O. y López C.M., “Modelización del efecto de la dilatación en materiales cuasifrágiles. Influencia en modo mixto de fractura”. *Anales de Mecánica de la Fractura*, Vol. 22, pp. 541-546 (2005).
- [4] Hillerborg A., Modéer M. y Petersson, P.E., “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements”, *Cement and Concrete Research*, 6 (6): 773-781 (1976).
- [5] Carol, I., Prat, P. C., y López, C. M. “A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis”, *J. Engng. Mech. ASCE*, 123, pp. 765-773 (1997).
- [6] García Álvarez, V. O., “*Estudio de la fractura en modo mixto de los materiales cuasifrágiles: Aplicación al hormigón convencional y al hormigón de alta resistencia*”, Tesis Doctoral, ETS. d’Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (1997).
- [7] Willam, K. J., “Experimental and computational aspects of concrete fracture”, en *Computer aided analysis and design of concrete structures* (Ed. F. Damjanic, H. Hinton, N. Bicanic and V. Simovic), pp. 33-70, Pineridge Press, New Jersey (1984).
- [8] García-Álvarez, V. O., Gettu, R. y Carol, I. “Numerical analysis of mixed mode fracture in concrete using interface elements”, in *ECCOMAS 2000*, Barcelona (2000).
- [9] López, C. M., “*Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones*”, Tesis Doctoral, ETS. d’Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (1999)