

ANÁLISIS DE LA FALLA DEL HORMIGÓN EN MODO MIXTO

Oscar I. Montenegro^a, Domingo Sfer^b e Ignacio Carol^a

^a ETSECCPB-UPC, Dpto. de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Catalunya.
Campus Nord, c/Jordi Girona 1-3 Edificio D-2 – Desp.212
08034 Barcelona, España. E-mail: oscar.montenegro@upc.edu
E-mail: ignacio.carol@upc.edu

^b Instituto de Estructuras. FACET. Universidad Nacional de Tucumán
Avda. Independencia 1800
4000 San Miguel de Tucumán. Argentina E-mail: dsfer@herrera.unt.edu.ar

Palabras Claves: Hormigón, Fractura, Experimentación, Modo mixto.

Resumen. El desarrollo de métodos numéricos para la simulación del comportamiento del hormigón ha continuado su avance en estos últimos años siguiendo diferentes caminos. Una de estas propuestas corresponde a la que se viene desarrollando en el grupo de Mecánica de Materiales (MECMAT) de la Escuela de Ingeniería Civil de la UPC de Barcelona (ETSECCPB-UPC). En esta se considera un modo mixto tipo asintótico o “modo IIa” con una segunda energía de fractura independiente y significativamente mayor que la del modo I tradicional de fractura (Carol y Prat, 1995). Según este modo, “modo IIa”, las fisuras estarían sujetas a compresión tan alta en el plano de fractura, que la dilatación sería nula y la fisura sería sensiblemente recta pasando a través de los agregados y el mortero. Esta propuesta se hizo en la década pasada y se ha implementado un modelo en un código FE a través de elementos llamados “elementos de interfase de espesor nulo”, estos se han utilizado con bastante éxito en un gran número de estudios numéricos. Sin embargo la validación experimental de este modo de falla era una tarea pendiente. En este sentido se pueden encontrar en la literatura intentos de reproducir las fisuras de corte-compresión sobre el hormigón en vigas entalladas sujetas a compresión transversal. No obstante, en la mayoría de los casos la fisura tiene la tendencia a desviarse del plano de fractura prescrito y los resultados dejan de ser útiles para este propósito. En este trabajo, se describe el trabajo experimental desarrollado hasta el momento en el grupo de Investigación.

Las especímenes utilizados son similares a los propuestos por Luong (Luong, 1990). En estos se aplica la carga verticalmente en el cilindro exterior y se soportan en el núcleo central, en la propuesta original se hacía sin confinamiento. En el montaje desarrollado, las probetas son introducidas en una cámara triaxial de gran capacidad, protegidas con membranas y sujetas a una presión de confinamiento constante antes de aplicar la carga vertical.

Los resultados obtenidos son prometedores, con diagramas carga – desplazamiento y curvas de dilatación que muestran las tendencias esperadas. Por otro lado estos resultados experimentales preliminares han permitido una mejor interpretación del fenómeno y contrastar cualitativamente con los resultados numéricos conseguidos.

En este trabajo se describe el proceso experimental y los avances realizados en la implementación numérica de un modelo realista que pueda reproducir estos ensayos los que tienen por el objeto evaluar la energía de fractura asociada bajo el “modo IIa”.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, un buen número de modelos para el análisis del comportamiento mecánico del hormigón incorporan como parámetro la energía de fractura en modo I (modo de tracción pura), G_f^I . Algunos modelos también consideran una segunda energía de fractura en modo mixto, aunque no existe unanimidad de criterio para definir este modo de fractura para estos materiales. En el grupo de Mecánica de Materiales de la UPC ya hacia 1990 se introdujo el concepto de modo mixto corte-compresión asintótico o modo IIa consistente en corte y muy alta compresión sobre el plano de fractura, de tal forma que toda dilatancia queda impedida (Carol y Prat, 1990; Carol, Prat y López, 1997).

En hormigón convencional, los áridos son más resistentes que el mortero, y la interfase entre ellos representa el punto más débil del compuesto. Así, en modo I, las fisuras normalmente se inician en las interfase árido-mortero y posteriormente se conectan entre sí a través de la pasta, dando lugar al tipo de trayectoria sinuosa de la Figura 1a. Por otro lado, el modo IIa correspondería a un caso ideal con desplazamiento de corte pero dilatancia totalmente impedida, la única opción cinemáticamente posible para la fisura es una línea recta que corte indistintamente áridos y mortero, (ver figura 1b)

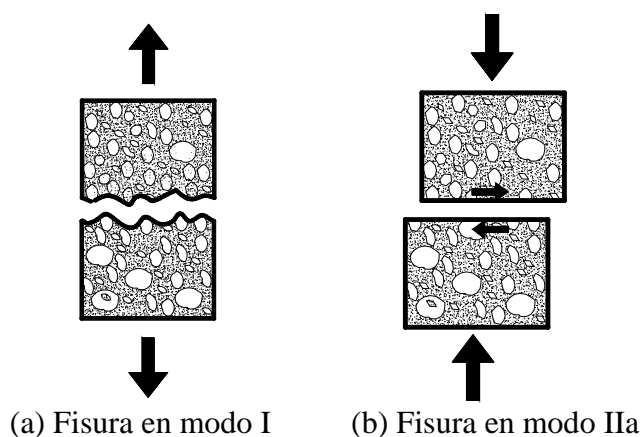


Figura 1. Modos de Falla

En la literatura el comportamiento del hormigón en modo I de fractura está ampliamente documentado. En cambio, la fractura en modo mixto está mucho menos estudiada, aún existen controversias respecto a su existencia o no para estos materiales.

En este artículo se presenta el trabajo que se está realizando para reproducir una fisura en condiciones aproximadas al modo IIa (que como se ha dicho es un modo asintótico) y a caracterizar los parámetros correspondientes a este modo de fractura, fundamentalmente la energía G_f^{IIa} . Antecedentes de este trabajo se hallan documentados en trabajos anteriores (Montenegro, Carol y Sfer, 2007; Montenegro, Sfer y Carol, 2007). Reproducir este comportamiento experimentalmente no es trivial, para ello se ha adaptado la propuesta original de Luong (Luong, 1990; Luong, 1992), y aplicado el confinamiento lateral mediante la introducción de los especímenes en una célula triaxial. Estos ensayos experimentales se han acompañado de simulaciones numéricas mediante un modelo de elementos finitos en 3D, usando elementos de interfase, en los que se han usado los desarrollos del mismo grupo de investigación (Carol, Prat y López, 1997).

2 DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

Para estos ensayos se han usado muestras cilíndricas de 100 mm de diámetro y 40 mm de altura, con entallas concéntricas, también cilíndricas, de 10 mm de profundidad ubicadas en ambas caras, superior e inferior. Con el fin de conseguir que el plano de fractura sea más vertical se han practicado entallas de distintos diámetros en cada cara de la probeta (Montenegro, Carol y Sfer, 2007; Montenegro, Sfer y Carol, 2007).

En la Figura 2 se muestra un corte de las muestras utilizadas en los ensayos.

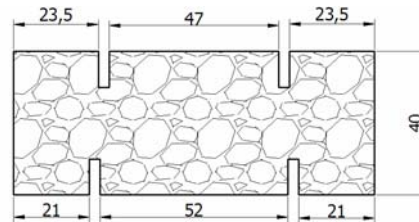


Figura 2. Corte de los especímenes

El principio de aplicación de cargas se muestra en el croquis de la figura 3.

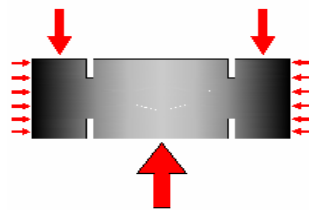


Figura 3. Aplicación de Carga

Por otro lado en el esquema de la figura 4 se observa la disposición de la muestra entre los cabezales de carga y su ubicación dentro de la célula triaxial. Se distingue por un lado el caso no confinado donde el confinamiento lateral es nulo y el caso confinado donde se aplica un confinamiento sobre la cara lateral exterior de la muestra.

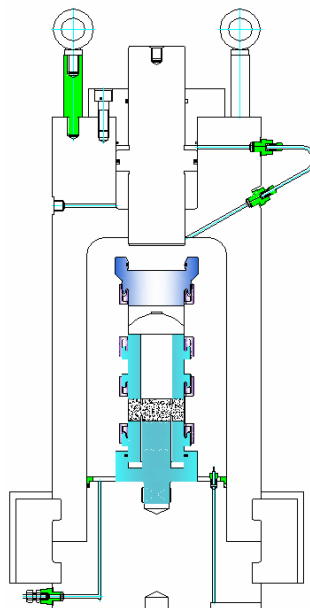


Figura 4. Disposición general del espécimen en la Célula Triaxial

Para realizar la medición de los desplazamientos verticales se han utilizado LVDTs acoplados adecuadamente al cabezal de aplicación de cargas, con lo que se han podido medir directamente los desplazamientos producidos en el plano de fractura. Se ha utilizado para ello LVDTs sumergibles, que permiten operar adecuadamente hasta presiones de confinamiento de 21 MPa. Por otro lado la medición de los desplazamientos circunferenciales de las muestras, se han realizado con un dispositivo que consta de una cadena circunferencial envolvente de longitud invariable que lleva instalado en sus extremos un transductor extensométrico que permite medir el cambio de longitud de la circunferencia.

Para la realización del ensayo el espécimen se coloca entre los cabezales especiales ya mencionados. La muestra recibe la carga vertical desde arriba sobre la superficie anular exterior (entre la entalla y el límite de la probeta). Por la parte inferior, la carga se transmite a la superficie central de la probeta (círculo interior a la entalla). Esta disposición permite que la transmisión de las cargas se realice en un modo predominante de corte (o modo II) a lo largo del ligamento cilíndrico entre ambas entallas.

Básicamente los ensayos realizados se dividen en dos grupos, los sin confinamiento lateral, que se realizan de acuerdo a lo explicado anteriormente y los de corte con confinamiento lateral. En estos últimos antes de cargar la muestra verticalmente, estas se someten a una presión de confinamiento lateral que se mantiene constante durante el resto del ensayo.

Para este último tipo de ensayos la superficie de fractura prescrita se encuentra sometida a un modo de corte – compresión.

Los ensayos confinados se realizan para distintas presiones de confinamiento lateral, ya que se busca llegar a determinar la energía de fractura en modo II asintótico, el cual se logra para presiones de confinamiento elevadas.

3 DESCRIPCION NUMERICA

Este ensayo ha sido reproducido mediante un modelo numérico tridimensional de elementos finitos, figura 5. Se ha realizado el mallado de un cuarto de probeta. El mallado se ha realizado parcialmente a través del pre y pos procesador GiD.

Básicamente el mallado del modelo se ha realizado utilizando elementos tetraédricos con un comportamiento elástico ($E = 35000$ MPa, $\mu = 0,2$). Además en este modelo se han utilizado elementos tipo junta de espesor nulo, cuyo comportamiento se rige por el modelo constitutivo anteriormente descrito que tiene en cuenta las energías de fractura en modo I y en modo IIa (Carol, Prat y López, 1997). Se han dispuesto estos elementos a lo largo del plano de fractura circunferencial, también se ha incorporado un plano de junta en dirección radial, ubicado en la zona central del cuarto de probeta, para poder representar las fisuras de tracción que se producen en ensayos con bajo o nulo confinamiento debido a la dilatación.

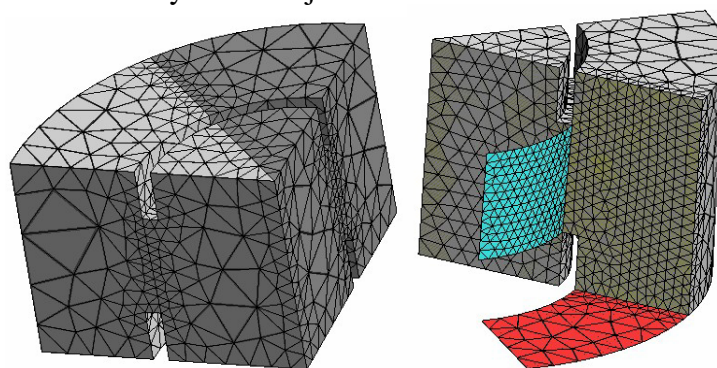


Figura 5. Modelo 3D utilizado

Los parámetros utilizados en esta descripción numérica son:

- $tg\phi = 0.8$ (ángulo de fricción)
- $tg\phi_r = 0.3$ (ángulo de fricción residual)
- $\chi_o = 6.5MPa$ (resistencia a tracción)
- $C = 27MPa$ (cohesión inicial)
- $G_f^I = 0.15N / mm$ (energía de fractura en modo I)
- $G_f^{IIa} = 1.6N / mm$ (energía de fractura en modo IIa)

Para los elementos junta se utiliza una ley constitutiva basada en la teoría de la elasto-plasticidad, incorporando conceptos de la mecánica de fractura (Carol y Prat, 1990; Carol, Prat y López, 1997). El comportamiento está formulado en términos de las componentes normal y tangencial de las tensiones en el plano de la junta, y los desplazamientos relativos correspondientes.

La superficie de fractura se define como una hipérbola dada por (1) en el espacio de las tensiones (σ_N, σ_T).

$$F = \sigma_T^2 - (c - \sigma_N \cdot \tan \phi)^2 + (c - \chi \cdot \tan \phi)^2 \tag{1}$$

Donde: $\sigma_T^2 = \tau_1^2 + \tau_2^2$ (Tensión tangencial en el plano de de la junta)

σ_N (Tensión normal en el plano de la junta)

En ésta, χ es el vértice de la hipérbola y representa la resistencia a tracción, y c y $\tan\phi$ son los parámetros de la asíntota y también tienen un claro significado físico: c es la cohesión aparente y $\tan\phi$ el ángulo de fricción interna del material. Se utiliza un potencial plástico no asociado, tanto en tracción como en compresión, para permitir una dilatación decreciente con el aumento del nivel de compresión (figura 6a). El trabajo disipado en procesos de fractura se emplea en la definición de las leyes de reblandecimiento y consiste en la única variable de historia del modelo (figura 6d y e).

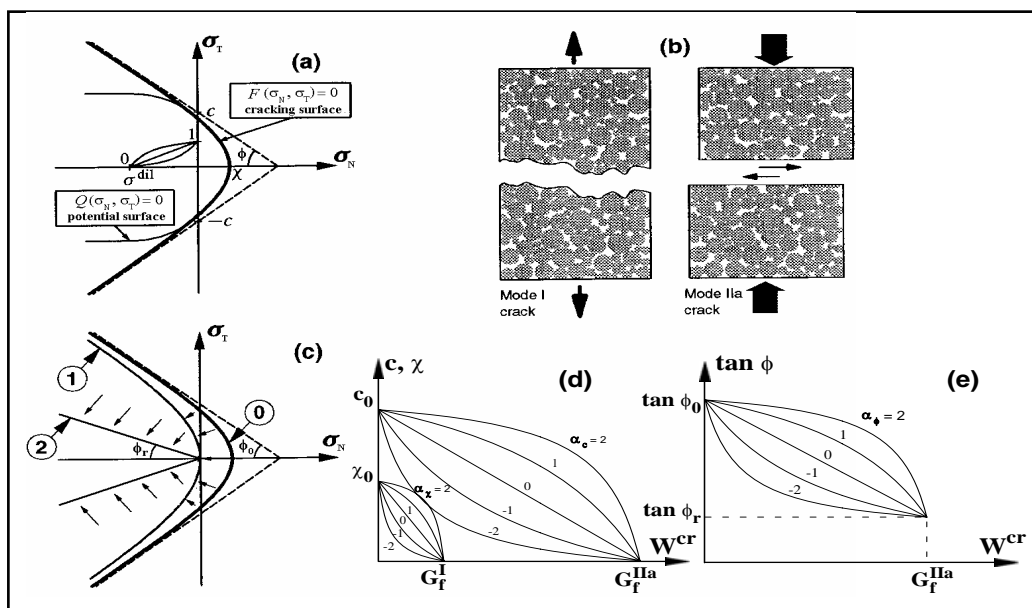


Figura 6. Modelo de junta: (a) Superficie de fractura y potencial plástico, (b) Modos básicos de fractura, (c) Evolución de la superficie de fractura, y (d) y (e) Leyes de reblandecimiento.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han realizado diferentes series de ensayos preliminares hasta lograr un buen ajuste y comportamiento de los diferentes dispositivos utilizados. Estas incluyen ensayos no confinados y ensayos con presiones de confinamiento lateral. En los ensayos realizados se ha registrado la carga vertical aplicada, los desplazamientos verticales de corte directamente producidos en el plano de fractura y los desplazamientos circunferenciales.

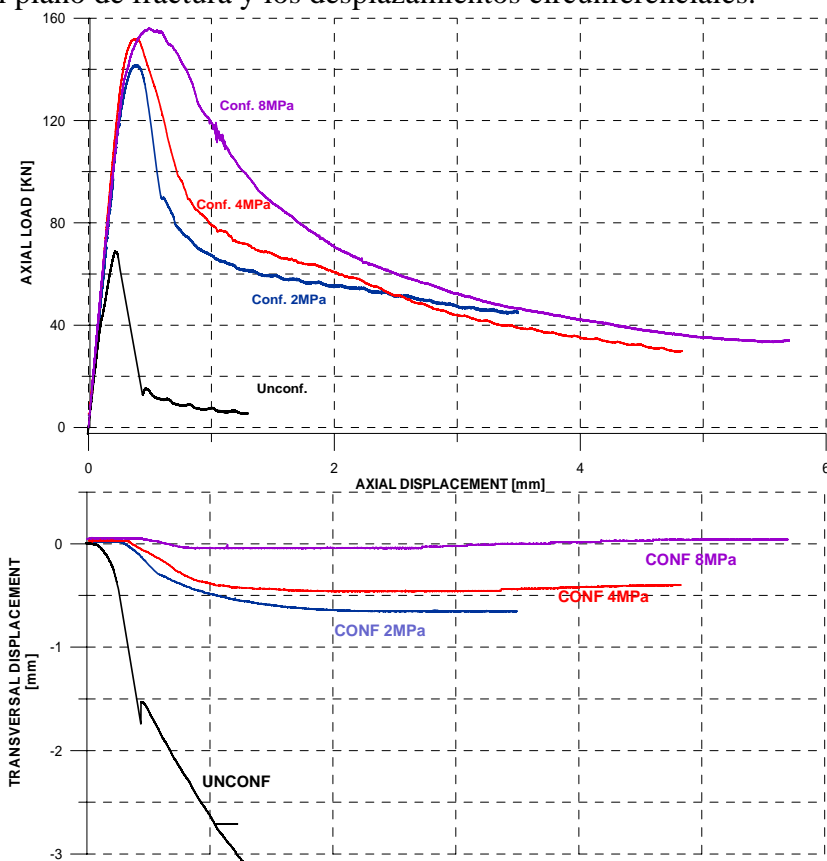


Figura 7. Resultados de la serie experimental

A partir de estos resultados se han obtenido curvas carga - desplazamiento vertical o de corte y curvas desplazamiento vertical o desplazamiento de corte - desplazamiento lateral.

En el gráfico de la figura 7 se muestran resultados de la última serie en donde se aplica un confinamiento de 8 MPa. Se observa en el gráfico que para un confinamiento de 8 MPa la dilatación es prácticamente nula, tal cual lo refleja el desplazamiento transversal o circunferencial.

5 RESULTADOS NUMERICOS

Los ensayos numéricos realizados han permitido confirmar cualitativamente lo que se ha obtenido experimentalmente. Cuantitativamente no se ha podido contrastar valores, pues se están realizando algunos cambios a nivel constitutivo en el modelo a fin de poder reproducir esta situación para los estados de carga que se tienen experimentalmente. En la figura 8 se muestra un gráfico de los resultados numéricos conseguidos hasta un confinamiento de 2 MPa, estos resultados se han expresado en los mismos términos que los obtenidos en forma experimental.

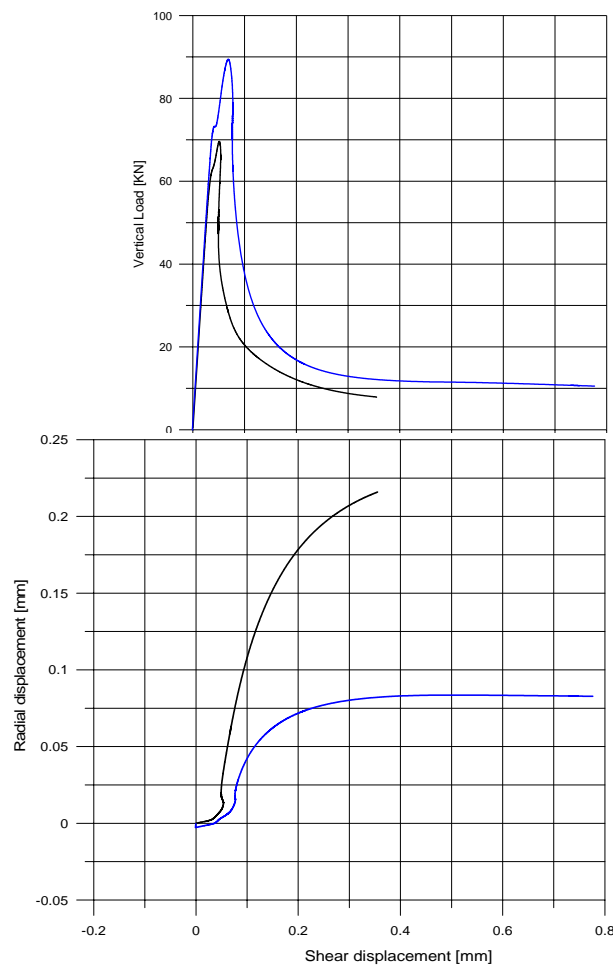


Figura 8. Resultados numéricos

6 INTERPRETACIÓN DEL COMPORTAMIENTO

El desarrollo numérico realizado ha contribuido en forma radical en la comprensión de los resultados experimentales. En la siguiente figura se presentan gráficos donde se aprecia la distribución de tensiones normales en la superficie de falla circunferencial en el caso numérico. Por un lado se observa que inicialmente la distribución de tensiones no es uniforme y que conforme se produce el proceso de fractura circunferencial se tiende a una distribución uniforme. Además se observa claramente que producida la fisura circunferencial, bajo confinamientos leves, la tensión normal puede ser mayor que la de cámara, lo cual evidencia que en este caso el efecto de la dilatación genera tensiones normales. Por otro lado cuando se incrementa la presión de confinamiento, la dilatación disminuye hasta anularse, en cuyo caso la presión de cámara es directamente la tensión normal.

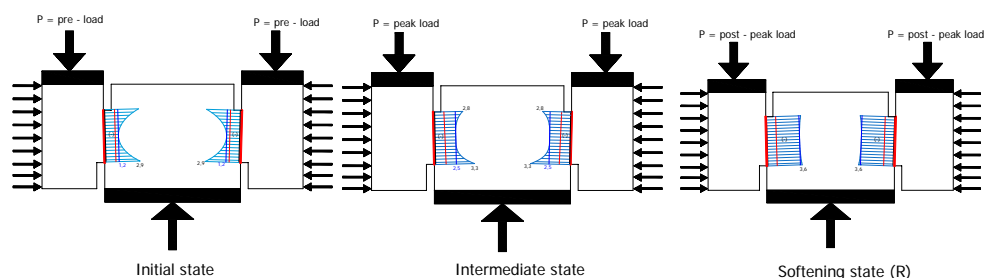


Figura 9. Distribución de Tensiones Normales conforme avanza el proceso de falla

7 CONCLUSIONES

Los resultados experimentales han permitido en primer lugar observar que con un incremento del confinamiento se produce una disminución de la dilatancia, por otro lado se observa que independientemente de la presión de confinamiento la fractura se produce en la superficie prevista y por último se ha podido visualizar el modo II asintótico del cual no se tienen antecedentes. Con un confinamiento de 8 MPa se ha observado que la fractura de corte involucra tanto árido como matriz, tal cual se había propuesto en el modelo de junta. En la siguiente figura se muestra una fotografía de un corte realizado sobre el espécimen ensayado.



Figura 10. Corte en espécimen ensayado

Los resultados numéricos conseguidos han permitido confirmar que cualitativamente se verifican los ensayos experimentales realizados, aunque se requieren todavía realizar algunos ajustes. Por otro lado estos resultados han representado una herramienta importante a la hora de interpretar el proceso de falla.

La actual propuesta es la de continuar con los ajustes en el modelo constitutivo a fin de poder reproducir los resultados experimentales, por otro lado en la faz experimental repetir los ensayos con niveles de confinamiento mayores, a fin de poder obtener la energía de fractura G_f^{IIa} como un parámetro al igual que la G_f^I . De manera que directamente el área encerrada por la curva carga – desplazamiento axial y la recta de la carga residual sea la energía de fractura G_f^{IIa} .

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al MEC (Madrid), la beca FPU que está permitiendo desarrollar este trabajo. El segundo autor agradece la ayuda para sus visitas a la UPC; procedentes del proyecto 2005SGR-00842 de DURSI-Generalitat de Catalunya (Barcelona). Finalmente, se hace constar la financiación básica de los proyectos BIA2006-12717 (MEC) y 2004/33 (MFOM, Madrid). Por otro lado se agradece la financiación dada por el proyecto de Investigación E26/313 del CIUNT (Universidad Nacional de Tucumán)

REFERENCIAS

- Carol, Prat. Multicrack model based on the theory of multisurface plasticity and two fracture energies. In COMPLAS 4. CIMNE (UPC), edited by E. Oñate et al. eds. Barcelona, España. Pp 1583-1594. (1995)
- Carol, Prat, Lopez. Normal shear cracking model: Application to discrete crack analysis. Journal of Engineering Mechanics. Pp 765-773. (1997)
- Luong, M.P.. "Tensile and shear strength of concrete and rock". Engineering Fracture Mechanics. Vol 35, N°1/2/3, pp 127-135. (1990)
- Luong, M.P.. "Fracture testing of concrete and rock materials". Nuclear Engineering and Design 133, pp 83-95. (1992)
- Montenegro, O.I., Carol, I., and Sfer, D.. "Characterization of confined mixed-mode fracture in concrete". FraMCoS 6 congress. Catania. Italy. (2007). In et. al., A. Carpinteri, editor, New trends in Fracture Mechanics of Concrete (FRAMCOS6), pp. 205-209, Catania, Italia, 2007. Taylor and Francis/balkema. (2007)
- Montenegro, O.I., Sfer, D., and Carol, I.. "Characterization of concrete in mixed mode fracture under confined conditions". ICEM 13. In Gdoutos, E.E., editor, Experimental analysis of nano and engineering material and structures, p.p. 1-8. Springer. (Proc. of the 13th Int. Conf., Alexandroupolis, Jul71-6/2007). (2007)