

EFECTO DE LA FISURACIÓN DIFUSA EN EL ENSAYO DE COMPRESIÓN DIAMETRAL

I. Arbilla, J. Planas, G.V. Guinea, M. Elices

Universidad Politécnica de Madrid
Departamento de Ciencia de Materiales

E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. c/ Prof. Aranguren s/n, 28040 Madrid

Resumen. El modelo de fisura cohesiva describe de forma sencilla la fisuración del hormigón y otros materiales cuasifrágiles. La formulación clásica considera comportamiento elástico lineal del material que rodea la fisura cohesiva. Diferentes estudios numéricos demuestran que se sobrepasa la resistencia a tracción en ese material, por lo que debe existir fisuración secundaria. El modelo de fisuración difusa, ampliación del modelo cohesivo clásico, simula las fisuras secundarias como una distribución continua de fisuras cohesivas. Su comportamiento conjunto es similar al de un material elastoplástico con criterio de plastificación de Rankine y regla de flujo asociada. Esta comunicación resume los aspectos básicos del modelo propuesto y el efecto de la fisuración secundaria en el ensayo de compresión diametral.

Abstract. The cohesive crack model is a simple way to describe fracture in concrete and other quasibrittle materials. The standard model assumes that the behaviour of the material surrounding the cohesive crack remains linear elastic. Detailed numerical analysis show that the tensile strength is exceeded in areas outside the main cohesive crack. Secondary cracking must then occur. Diffuse crack model follows directly from the standard cohesive crack model and describes the secondary cracking as a continuous distribution of cohesive cracks. The bulk material behaves as an elastic-plastic material with Rankine's yield criterion and associate flow rule. This paper shows the main aspects of the diffuse crack model and the influence of diffuse cracking on the mechanical response of diagonal splitting test specimens.

1. INTRODUCCIÓN

El modelo de fisuración cohesiva clásico describe con buena aproximación la fractura del hormigón y otros materiales cuasifrágiles cuando este proceso se produce por el crecimiento de una única grieta macroscópica. Sin embargo, un análisis en profundidad del proceso de fractura muestra que la solución supuesta (una única grieta que se propaga en un medio elástico) no es consistente con las hipótesis de partida del problema.

Diferentes trabajos numéricos que han utilizado el modelo cohesivo clásico [1,2] han comprobado la presencia de zonas del material situado fuera de la fisura cohesiva principal en las que la tensión principal mayor es superior a la resistencia a tracción del material, f_t . Para ser coherentes con los postulados del modelo, en esas zonas deben desarrollarse fisuras secundarias.

En este artículo se describe el modelo de fisuración difusa. Este modelo deriva directamente del modelo cohesivo clásico y permite describir la fisuración secundaria. Utilizamos a continuación el modelo desarrollado para analizar la influencia que la fisuración secundaria tiene sobre uno de los ensayos más extendidos sobre hormigón: compresión diametral (brasileño).

2. MODELO DE FISURACIÓN DIFUSA

El modelo teórico que más adelante se presenta es una generalización a tres dimensiones del modelo uniaxial propuesto en [3]. Comenzamos con una breve exposición de las ideas básicas del modelo uniaxial.

Supongamos una cierta zona de un material cuasifrágil sometido a un estado uniaxial de tensiones. Si en este material aparece un gran número de fisuras cohesivas paralelas entre sí y espaciadas una distancia s , relativamente pequeña, se puede aproximar el efecto del campo de fisuras mediante una deformación inelástica media ϵ^p dada por

$$\epsilon^p = w/s \quad (1)$$

donde w es la apertura de cada fisura (tomada en valor medio).

Si conocemos la curva de ablandamiento de la fisura cohesiva, que proporciona la relación entre la tensión σ transmitida entre las caras de la fisura y la apertura de la fisura w :

$$\sigma = f(w) \quad (2)$$

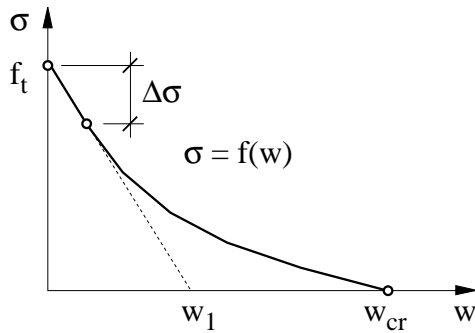


Fig.1 : Curva de ablandamiento genérica

podemos relacionar tensión y deformación inelásticas sin más que despejar w de (1) y sustituir en (2):

$$\sigma = f(s\varepsilon^p) = f_s(\varepsilon^p) \quad (3)$$

Si s es lo suficientemente pequeño y la curva de ablandamiento presenta un tramo inicial sensiblemente lineal, es posible relacionar de forma sencilla la disminución en la tensión transmitida entre caras de fisura en el caso de una deformación inelástica no muy grande.

La relación se obtiene aproximando la curva de ablandamiento por una recta en su tramo inicial, tal como indica la Fig. 1. Usando esta aproximación, la pérdida de resistencia $\Delta\sigma$ viene dada por

$$\Delta\sigma = f_t s \varepsilon^p / w_1 \quad (6)$$

En el caso límite, cuando la distancia entre fisuras tiende a cero y, por tanto, también lo hace la disminución en la tensión transmitida entre caras de fisura, el modelo se transforma en un modelo rígido-plástico, al menos para carga monótona.

En los casos en los que la fractura se produce por propagación de una única fisura macroscópica, el avance de esta última produce la descarga de ciertas partes de la estructura. Por si alguna de estas partes ha experimentado un proceso de fisuración secundaria, es preciso hacer alguna hipótesis sobre el comportamiento de las fisuras secundarias en descarga.

En [3] se justifica que, para aperturas pequeñas de grieta, se puede aceptar que las grietas no se cierran durante la descarga. Desde el punto de vista tensión-deformación, esto implica que el modelo resultante es un modelo elástico-perfectamente plástico gobernado por un criterio de plastificación de Rankine.

Si por contra consideramos la opción de separación entre fisuras distinta de cero, $s \neq 0$, el modelo describe la fisuración difusa como un modelo elástico-plástico con ablandamiento por deformación.

3. MODELO TRIDIMENSIONAL

La generalización a tres dimensiones más sencilla es la de un modelo elastoplástico de Rankine con regla de flujo completamente asociada. La relación tensión-deformación (tensorial), el criterio de plastificación (escalar) y la regla de flujo (tensorial) son, respectivamente

$$\sigma = \mathbf{E} (\varepsilon - \varepsilon^p) \quad (5)$$

$$\sigma_I - f_s(\varepsilon^p) = 0 \quad (6)$$

$$d\varepsilon^p = \mathbf{P}_I d\varepsilon^p \quad (7)$$

donde σ es el tensor de tensiones, \mathbf{E} el tensor de cuarto orden de módulos elásticos, ε el tensor de deformaciones, ε^p el tensor de deformaciones plásticas, σ_I la tensión principal mayor, ε^p la deformación plástica equivalente y \mathbf{P}_I el proyector del tensor de tensiones sobre su dirección principal asociada el valor principal mayor (es decir $\mathbf{P}_I \cdot \sigma = \sigma_I$), donde el punto indica producto escalar de dos tensores de segundo orden.

La función $f_s(\varepsilon^p)$ es la misma que la definida en la ecuación (3) para el caso unidimensional. Por tanto, conocida la curva de ablandamiento de la fisura cohesiva y la separación s entre fisuras, el modelo queda totalmente definido.

4. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

El modelo ha sido implementado numéricamente en el código de elementos finitos comercial ABAQUS. Los cálculos analizan el desarrollo simultáneo de una fisura principal y zonas de fisuración difusa.

La fisura principal se representa mediante elementos tipo muelle con ablandamiento por deformación perpendiculares al camino de la fisura. El comportamiento de los muelles se define a través de una relación fuerza-elongación de tipo poligonal que reproduce la curva de ablandamiento supuesta para la fisura cohesiva.

El comportamiento de las zonas con fisuración difusa es el descrito en el apartado anterior. Al no disponer ABAQUS de modelos elastoplásticos con criterio de plastificación de Rankine y regla de flujo asociada, ha sido preciso elaborar una subrutina de usuario con la definición del material.

La subrutina se ha desarrollado para el caso bidimensional y admite una función de ablandamiento $f_s(\varepsilon^p)$ de tipo poligonal, para cuya definición sólo es preciso conocer la función de ablandamiento del material y el espaciamiento s supuesto entre fisuras.

5. CÁLCULOS NUMÉRICOS

Para el estudio del ensayo de compresión diametral seguimos un esquema similar al utilizado en [4] para el estudio del ensayo de flexión en tres puntos.

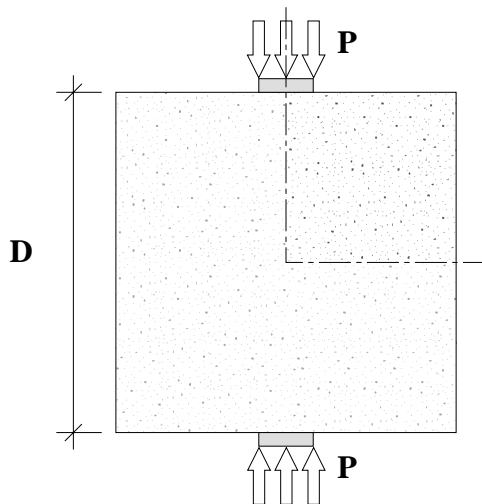


Fig. 2: Esquema del ensayo de compresión diametral. El modelo de elementos finitos sólo representa el cuarto superior derecho de la probeta.

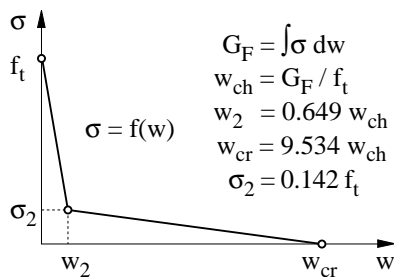


Fig. 3: Función de ablandamiento utilizada en los cálculos.

La malla utilizada representa únicamente, y dada la simetría del problema, el cuarto superior derecho de la probeta (Fig. 2). Los cálculos barren seis tamaños diferentes de probeta y dos anchos de reparto de la carga.

Para cada geometría realizamos dos cálculos, para dos de los posibles comportamientos del material fuera de la fisura principal: (1) elástico; y (2) elástico-plástico con ablandamiento. En el segundo caso suponemos que sólo se puede desarrollar una fisura en cada elemento finito, de manera que $s=h=D/64$, donde h es el lado del elemento cuadrado y D el canto de la viga. El resultado es un modelo esencialmente equivalente a los modelos clásicos de fisuración en banda ([5], Cap.8).

La curva de ablandamiento utilizada corresponde a la aproximación bilineal para un microhormigón ensayado en el laboratorio de los autores [6]. La Fig. 3 muestra dicha curva de ablandamiento junto con la definición de sus parámetros característicos, en particular la energía de fractura G_F y la apertura característica w_{ch} .

Los resultados que presentamos a continuación están adimensionalizados. Son por tanto válidos para cualquier material cuya curva de ablandamiento tenga las mismas dimensiones características que la Fig. 3.

Para la adimensionalización del canto de la probeta, D , usamos la longitud característica l_{ch} , definida como

$$l_{ch} = E G_F / f_t^2 \quad (6)$$

donde E es el módulo de elasticidad. Para el microhormigón utilizado $l_{ch} = 122$ mm., y para un hormigón ordinario $l_{ch} = 300$ mm.

6. DISTRIBUCIÓN DE LA FISURACIÓN DIFUSA

Comprobamos que la fisuración difusa afecta a dos regiones de la probeta: la situada justo en torno a la fisura diametral principal y las caras superior e inferior de la probeta, en torno a los extremos de la zona de reparto de la carga.

La Fig. 4 muestra los perfiles de deformación plástica equivalente adimensionalizada correspondientes a tres tamaños de probeta y los dos anchos de reparto de la carga utilizados. Para adimensionalizar la deformación plástica equivalente hemos utilizado el valor de la deformación elástica correspondiente a una tensión igual a la resistencia a tracción del material, f_t/E .

Analizamos por separado el desarrollo del proceso en cada una de las dos regiones. La fisuración difusa junto a las caras superior e inferior de la probeta es tanto más importante cuanto más pequeña es la probeta.

Así, para una relación entre canto y longitud característica $D/l_{ch} = 0.15$ el desarrollo de la fisuración secundaria es más intensa en esta zona que junto a la fisura diametral principal. Por el contrario, para $D/l_{ch} = 3.60$ su extensión es despreciable.

En la probeta con relación $D/l_{ch} = 0.15$ el desarrollo de la fisuración en la superficie presenta dos fases. Una inicial, nada más comenzar a aplicar la carga, en la que el material se acomoda en torno a la placa de carga. Su resultado es la aparición de una fisuración muy superficial.

Cuando la fisura principal cohesiva se desarrolla completamente, con su fondo casi en contacto con el bulbo de material comprimido bajo la placa de carga, el proceso cambia de lugar. Precisamente a la zona situada en torno a la placa de carga, donde la concentración de tensiones es ahora mayor y donde hay una serie de fisuras de piel que pueden ahora continuar su desarrollo.

La fisuración secundaria en torno a la fisura principal afecta a un reducido espesor de material: de igual forma, cuanto menor es el valor de la razón D/l_{ch} , mayor es el porcentaje de material afectado. Para el caso de reparto del 8% y $D/l_{ch} = 0.15$ el desarrollo es algo mayor.



Fig.4: Distribuciones de deformación plástica adimensionalizada para tres tamaños de probeta y dos anchos de reparto de la carga. El parámetro adimensionalizador es la deformación elástica correspondiente a una tensión igual a la resistencia a tracción del material.

Para los tamaños grandes la zona afectada es muy pequeña. La parte fundamental del proceso se concentra en una línea de espesor despreciable por lo que los resultados son muy similares a los de suponer material puramente elástico.

7. RESPUESTA MECÁNICA

El desarrollo clásico de un ensayo de compresión diametral finaliza tras alcanzarse la carga máxima, con un descenso brusco de la carga aplicada casi hasta cero. El resultado fundamental que se obtiene del ensayo es por tanto el valor de la carga máxima.

La Fig. 5 muestra la diferencia entre la carga máximas obtenidas con el modelo cohesivo clásico (material fuera de la fisura principal elástico lineal) y con el modelo de fisuración difusa. Comprobamos entonces que la carga máxima obtenida con los dos modelos es muy similar. Además la influencia del ancho de reparto de la carga es muy reducida.

La corrección de la incoherencia del modelo de fisura cohesiva clásico, impidiendo que en ningún punto se alcancen tensiones superiores a la resistencia a tracción del material, no modifica pues de forma sustancial la respuesta mecánica.

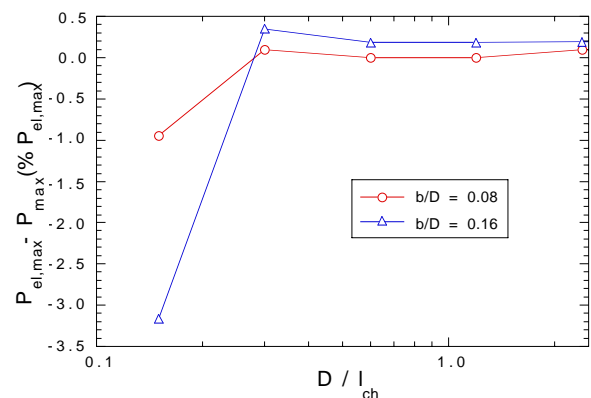


Fig. 5: Diferencia entre la carga máxima calculada con el modelo de fisuración difusa y la calculada para el comportamiento elástico.

8. COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las Figs. 6 y 7 comparan los resultados numéricos con los experimentales de Rocco [3]. Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio de los autores y fueron utilizados en la determinación de la curva de ablandamiento incluida en los cálculos.

El valor de referencia es la carga máxima P_N para el caso de una probeta de material elástico y lineal hasta rotura.

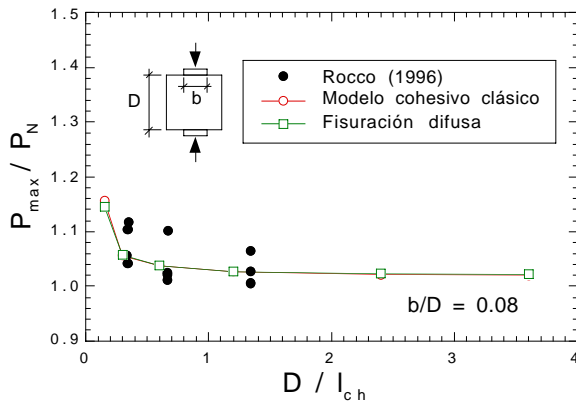


Fig. 6: Comparación con resultados experimentales. Ancho de reparto del 8%.

Cuando el ancho de reparto es del 8% (Fig.6), el modelo de fisuración difusa reproduce el comportamiento de los ensayos que alcanzaron un valor más bajo de la carga máxima.

En el caso del ancho de reparto igual al 16% del canto (Fig. 7) la situación es similar a la comentada para el anterior ancho de reparto, salvo para el tamaño más pequeño. Para este, el modelo de fisuración difusa predice una tensión de rotura menor que la correspondiente al modelo cohesivo clásico y más cercana a la mayor parte de los resultados experimentales.

9. CONCLUSIONES

- 1.- El modelo de fisuración difusa permite describir la fisuración secundaria que se produce en elementos estructurales que rompen a través de una única fisura principal.
- 2.- En el caso particular de probetas de compresión diametral, la fisuración secundaria se concentra en una franja de material muy estrecha en torno a la fisura principal.
- 3.- A la vista de todos los resultados numéricos obtenidos y de su análisis podemos concluir que, aunque desde el punto de vista formal el modelo de fisuración difusa supone corregir una de las carencias del modelo clásico de la fisura cohesiva, no modifica sustancialmente la respuesta mecánica. Ello justifica la utilización a nivel ingenieril del modelo cohesivo clásico y estiendo otros resultados en el mismo sentido, aunque distinto contexto [7, 8].

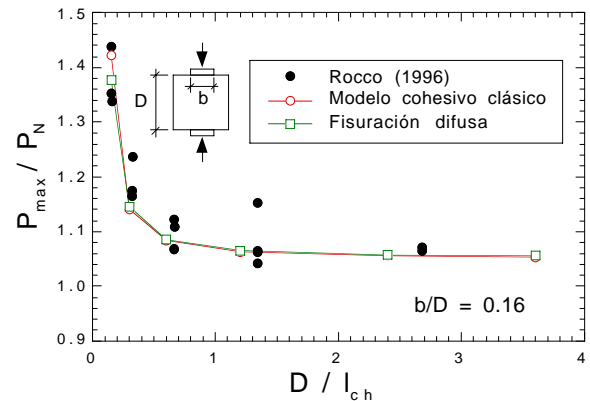


Fig. 7: Comparación con resultados experimentales. Ancho de reparto del 16%.

10. REFERENCIAS

- [1] Guinea G.V., "Medida de la Energía de Fractura del Hormigón", Tesis Doctoral, Dpto. Ciencia de Materiales, U.P.M., E.T.S.I. de Caminos (1990).
- [2] Olsen P.C., "Some comments on the bending strength of concrete beams", Magazine of Concrete Research, 46(168), pp 209-214 (1994).
- [3] Planas J. y Elices M., "Drying shrinkage effect on the modulus of rupture", Creep and Shrinkage of Concrete, Z.P. Bazant e I. Carol, eds., E & FN Spon, Londres, pp 357-368 (1993b).
- [4] Arbilla I., Planas J, Guinea G.V. y Elices M., "Efectos de la fisuración difusa alrededor de una fisura cohesiva", Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 16, pp 286-291 (1999).
- [5] Bazant Z.P. y Planas J., Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, W.F. Chen, ed., CRC Press LLC, Boca Ratón, Florida (1998).
- [6] Rocco C.G., "Influencia del tamaño y Mecanismos de Rotura del Ensayo de Compresión Diametral", Tesis Doctoral, Dpto. Ciencia de Materiales, U.P.M., E.T.S.I. de Caminos (1996).
- [7] Bolander J.E. y Kobashi Y., "Size effect mechanisms in numerical concrete fracture", Fracture Mechanics of Concrete Structures, F.H.Wittmann, ed., Aedificatio Publishers, Friburgo, Alemania, Vol. I, pp 535-542 (1995).
- [8] Nirmalendran S. y Horii H., "Analytical modelling of microcracking and bridging in fracture of quasi-brittle materials", Journal of Mechanics and Physics in Solids, 40, pp 863-886 (1992).