

## INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO EN LA TRANSICIÓN ENTRE ROTURA FRÁGIL Y ROTURA DÚCTIL EN VIGAS DÉBILMENTE ARMADAS

I. Arbilla, G. Ruiz y J. Planas

Departamento de Ciencia de Materiales  
Universidad Politécnica de Madrid  
ETS Ingenieros de Caminos  
Ciudad Universitaria, 28040 MADRID

**Resumen.** El recubrimiento de las armaduras es una de las variables que influyen en la transición entre comportamiento frágil y dúctil en vigas de hormigón débilmente armado (HDA). Tradicionalmente, la única finalidad del recubrimiento era la protección de las barras de acero y su contribución a la capacidad resistente de la viga despreciada, incluso en numerosos trabajos basados en la Mecánica de Fractura. La presente comunicación analiza la influencia del recubrimiento en la transición entre comportamiento frágil y dúctil en flexión de vigas HDA. El análisis se basa en conceptos de la Mecánica de Fractura, implementados en el modelo de la longitud efectiva de anclaje, que considera una fisura cohesiva que atraviesa una o varias capas de armadura, y que reproduce fielmente la respuesta de vigas HDA a lo largo de la transición frágil-dúctil. El análisis muestra que el aumento del recubrimiento disminuye la fragilidad hasta alcanzar un valor crítico, tras el cual la fragilidad crece de nuevo si se continúa aumentando el recubrimiento. Así mismo se observó que la separación vertical entre armaduras influye también en la transición frágil-dúctil de vigas HDA. Esta influencia también es apreciable en el caso de distribuciones con varias capas de armadura pero igual posición de su centro de gravedad.

**Abstract.** Reinforcement concrete cover is one of the parameters influencing the brittle to ductile transition of a lightly reinforced concrete (LRC) beam in flexure, and thus also influences the design criteria to obtain a ductile behavior, in particular the minimum reinforcement. Traditionally, the only purpose of the cover is to protect the steel bars, and its contribution to the beam strength is neglected, even in many works based on fracture mechanics. This paper analyzes the influence of the cover on the flexural transitional behavior of a LRC beam. The analysis is based on fracture mechanics concepts, implemented in the effective slip-length model, which considers a cohesive crack crossing one or various reinforcement layers, and was shown to describe well the experimental response of RC beams along the brittle to ductile transition. The analysis shows that increasing the cover thickness decreases the brittleness up to a certain critical thickness, after which the brittleness increases with further thickening of the cover. It is also found that the vertical spacing between layers influences the transitional behavior of a LRC beam too, even for bar distributions with identical centroid position.

## 1 INTRODUCCIÓN

La transición entre rotura frágil y rotura dúctil de vigas de hormigón débilmente armado (HDA) es en la actualidad objeto de estudio en numerosos centros de investigación [1], debido a que algunos criterios de diseño se centran en evitar el comportamiento frágil de estructuras de hormigón.

Tradicionalmente el recubrimiento se ha limitado a asegurar la transmisión de las tensiones de contacto entre acero y hormigón y la protección frente al ataque químico de las armaduras (corrosión). Los criterios de diseño en estado límite último tienden a reducir al mínimo el recubrimiento y la separación entre armaduras con el fin de conseguir el

máximo canto útil posible, con el fin de aumentar el momento flector que la armadura es capaz de soportar.

Como resultado de investigaciones llevadas a cabo sobre durabilidad de estructuras de hormigón armado [2], se percibe últimamente una tendencia a aumentar tanto el recubrimiento como el espaciamiento entre barras, pero la influencia de estos parámetros sobre la capacidad resistente y la ductilidad de la estructura es aún desconocida [3-6] o sencillamente despreciada [7, 8].

Sin embargo, recientemente ha empezado a considerarse que el recubrimiento de las armaduras es uno de los parámetros responsables de la transición dúctil-frágil [9] y cobra cuerpo la idea de que su influencia debe ser

estudiada independientemente de otros efectos clásicos como los del resto de dimensiones de la viga (por ejemplo su canto) y los debidos a variaciones de la capacidad mecánica de la armadura (cuantía de acero, tensión de plastificación del acero y propiedades que caracterizan el contacto entre hormigón y acero).

Este artículo analiza el papel que el recubrimiento juega en la transición frágil-dúctil de vigas de HDA utilizando el método de la longitud de anclaje efectiva, desarrollado por Ruiz, Planas y Elices [5, 10]. La Sección 2 resume las hipótesis básicas del modelo y los cálculos realizados. La Sección 3 estudia la influencia del espesor del recubrimiento, la Sección 4 la influencia del espaciamiento entre capas de armadura y la Sección 5 el efecto de tamaño para el caso de dos capas de armadura. La Sección 6 cierra el artículo con unas breves conclusiones.

## 2 ANTECEDENTES

Este apartado explica los conceptos fundamentales del modelo de la longitud efectiva de anclaje, capaz de reproducir el comportamiento en la transición frágil-dúctil de una viga de hormigón débilmente armada con una o varias capas de armadura, sometidas a un ensayo de flexión en tres puntos. Las hipótesis básicas son:

(1) Se propaga una única fisura cohesiva, localizada en la sección central, como indica la Fig. 1a. La fisura — sin la existencia de defecto o entalla previa— se inicia cuando la tensión de tracción en la fibra más solicitada alcanza la resistencia a tracción del material,  $f_t$ . A partir de este momento la grieta se abre, pero se sigue transmitiendo tensión entre sus caras, la *tensión cohesiva*. Dicha tensión, normal a las caras de la fisura cohesiva, es función únicamente de la apertura de fisura:

$$\sigma = f(w) \quad (1)$$

donde  $f(w)$  se denomina función de ablandamiento, y es considerada una característica del material.

El modelo cohesivo introduce un parámetro fundamental que representa la fragilidad intrínseca del hormigón [11]. Se denomina longitud característica  $\ell_{ch}$  y se define como

$$\ell_{ch} = \frac{E_c G_F}{f_t^2} \quad (2)$$

donde  $E_c$  es el módulo elástico del hormigón,  $G_F$  es la energía específica de fractura (trabajo necesario para separar las dos caras de una unidad de superficie de fisura), y  $f_t$ , tal y como se indicó anteriormente, es la resistencia a tracción del hormigón.

(2) La interacción entre hormigón y acero se representa mediante una relación de tipo rígido-plástico entre la tensión tangencial y el deslizamiento en la intercara

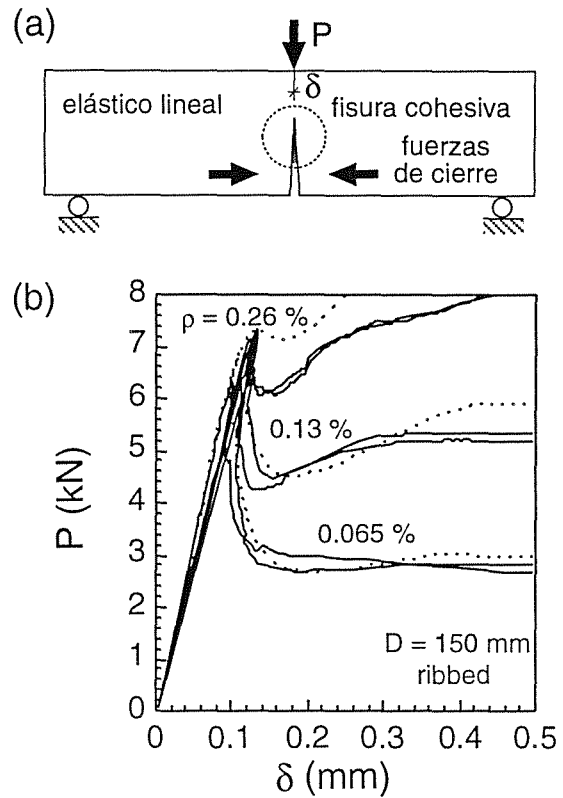


Figura 1: (a) Hipótesis básicas del modelo de la longitud de anclaje efectiva. (b) Predicciones para vigas con diferentes cuantías de refuerzo (trazo discontinuo).

hormigón-acero. El deslizamiento comienza tan pronto como la tensión tangencial alcanza la adherencia límite  $\tau_c$ , permaneciendo constante dicha tensión mientras tiene lugar el deslizamiento relativo. Para simplificar los cálculos numéricos la interacción acero-hormigón, que en realidad está distribuida a lo largo de la armadura, se aproxima por un par de fuerzas de módulo igual a la resultante de las tensiones tangenciales y aplicadas en el centroide de la distribución de dichas tensiones tangenciales (Fig. 1a).

(3) El comportamiento del hormigón fuera de la zona de fractura es elástico y lineal, mientras que el acero es elástico-perfectamente plástico.

Estas hipótesis han sido incorporadas a un programa de cálculo que usa el método de las fisuras superpuestas con matrices de influencia determinadas mediante cálculos por el método de los elementos finitos [12, 13]. El estudio del proceso de rotura en vigas de HDA con este modelo indica que depende de varios parámetros que pueden ser agrupados en dos familias: (a) parámetros geométricos que definen el tamaño de la viga y la posición de las capas de armadura, como son el canto de la viga  $D$ , el recubrimiento de la primera capa de armadura  $c$ , y el espaciamiento entre capas de armadura  $h$ ; y (b) parámetros que definen el comportamiento mecánico de la armadura,

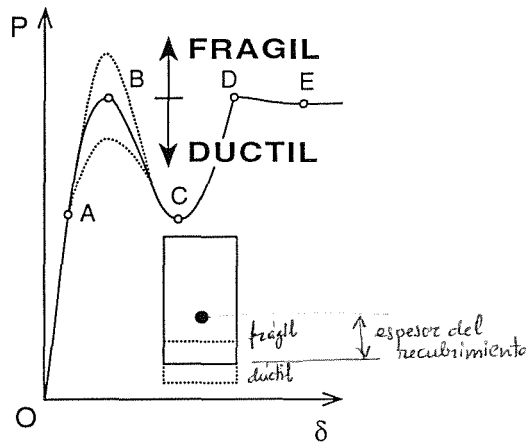


Figura 2: Transición entre comportamiento frágil y dúctil de vigas de hormigón débilmente armado en función del espesor del recubrimiento.

como son la cuantía de armadura  $\rho$ , la tensión de plasticificación del acero  $f_y$ , y la adherencia entre hormigón y acero. En particular, la adherencia aparece reflejada en el siguiente grupo adimensional:

$$\eta = \left[ n \frac{\tau_c p \ell_{ch}}{f_t A_s} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

donde  $\tau_c$  es la adherencia,  $p$  es el perímetro de las barras,  $A_s$  es la sección recta de la armadura y  $n = E_s/E_c$  es la relación entre los módulos de elasticidad de hormigón y acero, y  $\ell_{ch}$  y  $f_t$  ya han sido definidos.

Este modelo se comprobó mediante un programa experimental [5], que demostró que el modelo reproducía los resultados experimentales muy aceptablemente, sobre todo en la zona de carga máxima (Fig. 1b), y que era una herramienta adecuada para el estudio de este tipo de elemento estructural a través de ensayos numéricos, más baratos y adaptables que los ensayos reales.

Los resultados del modelo y de los ensayos indican que el comportamiento carga-desplazamiento ( $P - \delta$ ) de las vigas de HDA puede esquematizarse como se indica en la Fig. 2 para casos situados en la frontera entre fragilidad y ductilidad. Cuando la carga máxima de fisuración  $B$  se encuentra al mismo nivel que la meseta correspondiente a la carga de plasticificación  $E$ , la viga se comporta de modo dúctil ya que la rotura final se produce para un valor elevado del desplazamiento. Sin embargo, la carga de fisuración es muy sensible al espesor del recubrimiento y a la distribución de la armadura y variaciones en estos parámetros pueden producir la transición de comportamiento frágil a dúctil o viceversa. El presente artículo centra precisamente su atención en el estudio de la transición frágil-dúctil de vigas de HDA en función del recubrimiento y del espaciado de las armaduras.

El estudio considera vigas cuya geometría se define en la

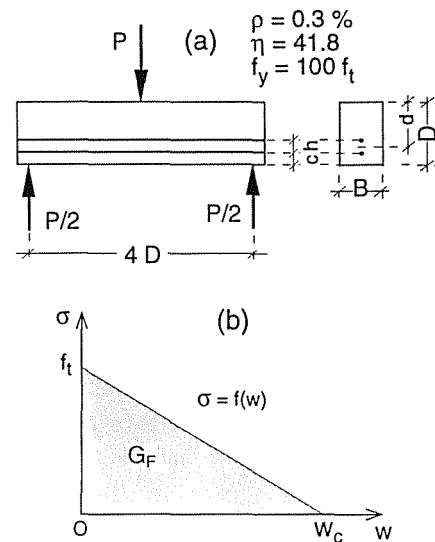


Figura 3: (a) Geometría de la viga y condiciones de carga. (b) Curva de ablandamiento para los cálculos numéricos.

Fig. 3a con una o dos capas de armadura, cuya posición viene definida por los valores  $c$  y  $h$  (Fig. 3a). El modelo cohesivo utiliza una función de ablandamiento lineal (Fig. 3b). Las propiedades de los materiales —también indicadas en la Fig. 3— se mantuvieron constantes a lo largo de los cálculos. En particular se tomó la cuantía  $\rho = 0.3\%$ , el parámetro de adherencia  $\eta = 41.8$  y el límite elástico del acero  $f_y$  igual a 100 veces la resistencia a tracción del hormigón.

Para dibujar las curvas resultantes de una forma adimensional que permita comparaciones directas entre ellas, se usan una carga y un desplazamiento adimensionales, identificados por un asterisco, definidos como sigue:

$$P^* = \frac{6P}{Bdf_t} \quad \delta^* = \delta \frac{f_t}{G_F} \quad (4)$$

donde  $d$  es el canto útil de la viga (distancia entre el centroide de la armadura y la fibra más comprimida de la sección; ver Fig. 3a).

A continuación se muestran los resultados de los cálculos con el fin de estudiar la influencia del espesor del recubrimiento en el caso de una única capa de armadura (Sección 3), la influencia de la separación entre capas cuando se usan dos capas de armadura (Sección 4) y la influencia del recubrimiento sobre el efecto de tamaño en el caso de dos capas de armadura (Sección 5).

### 3 INFLUENCIA DEL RECUBRIMIENTO

La figura 4 muestra las curvas  $P - \delta$  correspondientes a diferentes espesores del recubrimiento pero igual canto útil e igual distancia entre apoyos. La viga con menor recubrimiento presenta la carga de fisuración más alta. Este

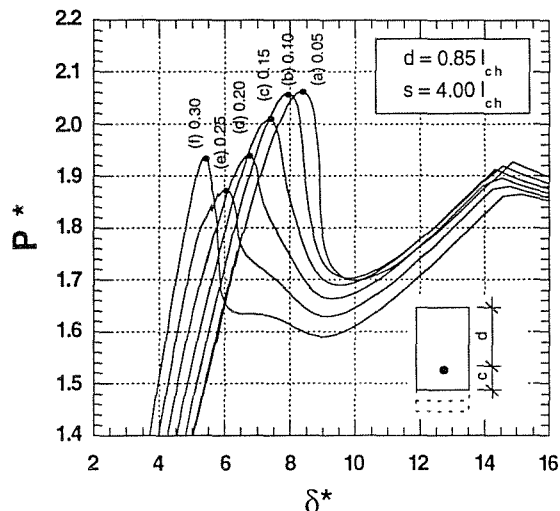


Figura 4: Curvas  $P - \delta$  para vigas de HDA con diferentes espesores de recubrimiento pero igual canto útil y luz.

pico de carga disminuye al aumentar el espesor del recubrimiento hasta que alcanza un mínimo para  $c = 0.25\ell_{ch}$  y posteriormente vuelve a aumentar si se sigue incrementando el espesor del recubrimiento.

El recubrimiento para el que el primer pico de carga es mínimo, es aquel  $c_c$  para el que, a igualdad de canto útil, la ductilidad es máxima. La determinación de  $c_c$  se llevó a cabo mediante una serie de cálculos con el modelo de la longitud efectiva de anclaje, con resultado es que este valor sólo depende del canto total y de los parámetros que caracterizan el inicio del ablandamiento cohesivo, y puede aproximarse por la siguiente expresión, obtenida por ajuste de los resultados numéricos:

$$c_c = 0.28\ell_1 \left( \frac{D}{\ell_1} \right)^{0.25}, \text{ con } \ell_1 = \alpha\ell_{ch} \quad (5)$$

donde  $\alpha$  es un parámetro adimensional que caracteriza la pendiente inicial de la curva de ablandamiento de la fisura cohesiva ( $\alpha = 1$  para el ablandamiento lineal). El parámetro  $\alpha$  puede obtenerse experimentalmente mediante el procedimiento descrito por Planas, Guinea y Elices [14] y su valor para un hormigón ordinario está en torno a 0.5; en caso de carecer de datos experimentales directos,  $\alpha$  puede estimarse en función del tamaño máximo del árido a partir de las propiedades de fractura del hormigón propuestas en el Código Modelo [15], lo que conduce a la expresión:

$$\alpha = \frac{1}{34} \left( 13 + 3 \frac{d_{max}}{d_0} \right) \quad (6)$$

donde  $d_{max}$  es el tamaño máximo del árido y  $d_0 = 8mm$ . (Debe señalarse que para los cálculos de este artículo  $\alpha = 1$  ( $\ell_1 = \ell_{ch}$ ) ya que, como ya se ha indicado, en los mismos se utilizó una función de ablandamiento lineal.)

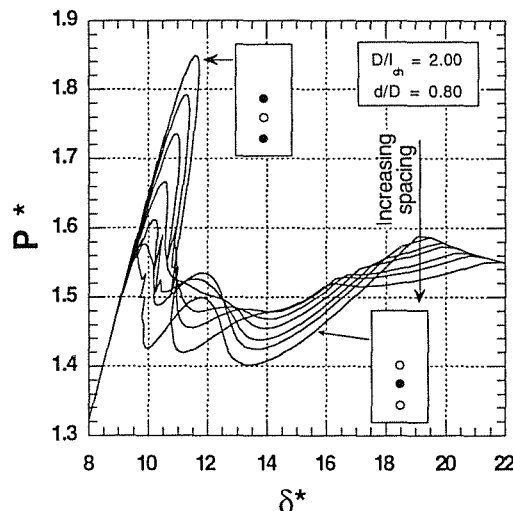


Figura 5: Curvas  $P - \delta$  para vigas con dos capas de armadura, separación creciente y centro de gravedad de las armaduras fijo.

#### 4 SEPARACIÓN ENTRE CAPAS DE ARMADURA

La Fig. 5 muestra las curvas  $P - \delta$  correspondientes a vigas de iguales dimensiones y cuantía de armadura, repartida ésta en dos capas idénticas cuya separación varía entre  $0.00D$  y  $0.35D$ , manteniéndose en todo momento su centro de gravedad a  $0.20D$  de la fibra inferior de la viga. Los cálculos se realizaron para  $D = 2\ell_{ch}$ .

Como puede observarse, el comportamiento de la viga es muy sensible a la separación entre armaduras, ya que la carga de pico correspondiente a una separación de  $0.35D$  es un 17% mayor que la correspondiente a separación de nula. El tramo con forma de U situado tras la carga de pico presenta una carga de pico secundaria para los casos en los que las dos capas de armadura se encuentran muy cercanas, pico secundario que desaparece conforme aumenta la separación entre armaduras. El aumento del espaciamiento también suaviza la carga de pico secundaria correspondiente a la plastificación de la capa inferior de armadura.

#### 5 EFECTO DE TAMAÑO EN VIGAS CON DOS CAPAS DE ARMADURA

Para estudiar el efecto de tamaño en vigas con dos capas de armadura se llevaron a cabo en primer lugar cálculos para vigas geoméricamente proporcionales. En estas vigas la capa inferior de la armadura fija se sitúa a  $c = 0.15D$  de la cara inferior de la viga y la capa superior a  $h = 0.10D$  de la capa inferior, con los resultados mostrados en la Fig. 6a. Como puede verse, la carga de pico disminuye a medida que aumenta el tamaño, provocando también el paso de un comportamiento frágil a uno dúctil.

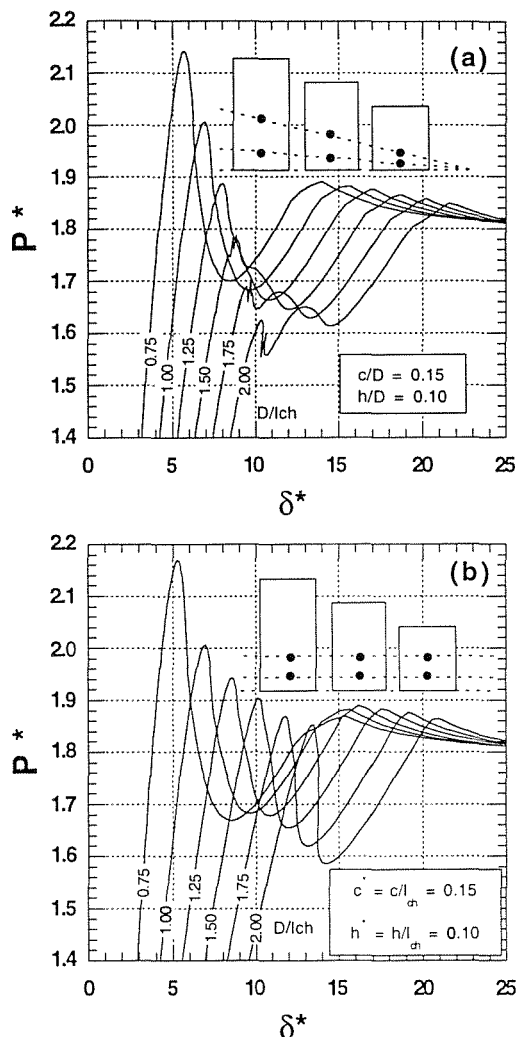


Figura 6: Efecto de tamaño en vigas con dos capas de armadura. Recubrimiento y separación entre armaduras (a) proporcionales (b) absolutos fijos.

Como las normas de construcción suelen fijar el valor mínimo del recubrimiento, se realizaron también cálculos para vigas de distinto tamaño en las que la capa inferior se encontraba a una distancia fija  $c = 0.15l_{ch}$  de la cara inferior de la viga y la capa superior a una distancia también fija  $h = 0.10l_{ch}$  de la capa inferior, con los resultados mostrados en la Fig. 6b. Se observa en este caso que con el aumento del tamaño disminuye también el primer pico de carga, con lo que se produce también una transición frágil-dúctil al aumentar el tamaño, aunque menos marcada que en el caso anterior.

6 CONCLUSIONES

El paso de comportamiento frágil a comportamiento dúctil en vigas de HDA es muy sensible al recubrimiento y la disposición de las armaduras respecto a su centro de gravedad.

Para una viga de canto dado es posible encontrar un valor crítico del recubrimiento que minimiza la altura del primer pico de carga y, por tanto, optimiza la ductilidad. Dicho recubrimiento es aquel para el que la zona de fractura llega hasta la armadura justo cuando se alcanza la carga de pico.

La separación entre armaduras en vigas con dos capas de armadura también influye en la ductilidad de las mismas. A igualdad de canto útil, el comportamiento es más frágil cuanto mayor es la separación entre capas de armadura.

El efecto de tamaño en vigas con dos capas de armadura es similar al de vigas con una única capa de armadura para probetas estrictamente proporcionales (tanto dimensiones exteriores como situación de armaduras). Este efecto se suaviza cuando se aumenta el tamaño manteniendo constantes el recubrimiento y la separación entre capas de armadura.

**Agradecimientos.** Los autores agradecen la ayuda económica proporcionada por la CICYT a través de los proyectos MAT97-1007-C02-2 y MAT97-1022.

7 REFERENCIAS

[1] ESIS TC9, "Scale effects and transitional failure phenomena of reinforced concrete beams in flexure", (Ed. A. Carpinteri), Pergamon, to appear (1998).

[2] CEB TC20, "CEB design guide for enduring concrete structures", (Eds. GEHO-CEB), Madrid (1993).

[3] Carpinteri, A., Ed., "Applications of Fracture Mechanics to Reinforced Concrete", Elsevier Applied Science, London (1990).

[4] Hededal, O. y Kroon, I.B., "Lightly reinforced high-strength concrete", M. Sc. Thesis, Ålborg University, Denmark (1991).

[5] Planas, J. Ruiz, G., y Elices, M., "Fracture of lightly reinforced concrete beams: theory and experiments", Fracture Mechanics of Concrete Structures, (Ed. Wittmann, F. H.), Aedificatio Publishers, Freiburg, 1179-1188 (1995).

[6] Ulfkjaer, J.P., Hededal, O., Kroon, I. y Brincker, R., "Simple application of fictitious crack model in reinforced concrete beams—Analysis and experiments", Size Effect in Concrete Structures (eds. H. Mihashi, H. Okamura and Z.P. Bazant), E & F.N. Spon, London, 281-292 (1994).

[7] Freyermuth y Aalami, "Unified minimum flexural reinforcement requirements for reinforced and prestressed concrete members", ACI Structural Journal, 94(4), 304-314 (1997).

[8] Gerstle, W. H., Dey, P. P., Prasad, N. N. V., Rahulku-mar, P. y Xie, M., "Crack growth in flexural members—A

fracture mechanics approach", ACI Structural Journal, 89(6), 617-625 (1992).

[9] Bache, H. H., "Design for ductility", Concrete Technology: New Trends, Industrial Applications, Aguado, A., Gettu, R., y Shah, S. P. (Eds.), E & FN Spon, London, 113-125 (1994).

[10] Ruiz, G. y Planas, J., "Propagación de una fisura cohesiva en vigas de hormigón débilmente armadas: modelo de la longitud efectiva de anclaje", Anales de Mecánica de la Fractura, 11, 506-513 (1994).

[11] Hillerborg, A., Modeer, 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, 773-782, (1976).

[12] Bazant, Z. P., y Planas, J., "Fracture and size effect in concrete and other quasi brittle materials", CRC Press, Boca Raton, Florida (1998).

[13] Ruiz, G., "El efecto de escala en vigas de hormigón débilmente armadas y su repercusión en los criterios de proyecto". (Ed. GEHO-IECA) Madrid (1998).

[14] Planas, J., Guinea, G. V., y Elices, M., "SF-2. Draft test method for linear initial portion of the softening curve of concrete", Draft Proposal to the Committee of the JCI International Collaboration Project on Size Effect in Concrete Structures. Dpto. de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (1994).

[15] CEB-FIP Model Code, "CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft", Bulletin D'Information, 203, 204 & 205, EFP Lausanne (1991).