

PREDICCIÓN DE ROTURAS EN ALAMBRES FISURADOS

A. Valiente Cancho
M. Elices Calafat

*Departamento de Física y Física de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid.*

La presencia de fisuras en armaduras de estructuras de hormigón es un problema que empieza a ser preocupante. En el presente trabajo se estudian los criterios que gobiernan la fractura de estos componentes, teniendo en cuenta el carácter tridimensional del problema y la diferente ductilidad de los diversos tipos de aceros empleados en su fabricación. Las predicciones teóricas correspondientes a distintos criterios se contrastan con resultados de ensayos de fractura realizados con diversos aceros de armaduras, encontrándose una adecuada correlación entre el criterio que rige la fractura de cada acero y sus características mecánicas.

The problem of cracks developed in wires and bars for reinforced and prestressed concrete is studied in this work. Several fracture criteria are analyzed because of the different ductilities which show the steels used for making the reinforcements. The three-dimensional condition of the problem is considered, too. The validity of the criteria is checked by comparing experimental results and theoretical predictions. It is found a good correlation between each material tested and the theoretical model of the criterium which describes better its fracture behaviour.

1.- INTRODUCCION

Una de las aplicaciones más interesantes de la Mecánica de Fractura en Ingeniería Civil es su utilización para predecir la carga de rotura de un alambre o barra fisurada y sometido a tracción. Las armaduras de acero empleadas en estructuras de hormigón armado y pretensado son componentes estructurales de fundamental importancia que plantean la necesidad de saber cómo se altera su capacidad resistente cuando contienen fisuras o defectos. En las actuales condiciones de servicio de las estructuras de hormigón, sus armaduras se ven afectadas por fenómenos de fatiga /1/ y corrosión bajo tensión /2/ que dan lugar al desarrollo de fisuras, y por fenómenos de fragilización /3/ que aumentan su sensibilidad a los defectos. Todo ello favorece la posibilidad de una rotura y representa un aumento de riesgo que justifica el interés de esta investigación.

La Mecánica de Fractura proporciona el marco adecuado para ello. El planteamiento seguido consiste en determinar condiciones de rotura teóricas para alambres fisurados a partir de criterios generales de fractura, y realizar la experimentación adecuada con aceros de armar y pretensar para contrastar la validez de los resultados teóricos de cara a la resolución del problema planteado.

2.- ANALISIS TEORICO

2.1.- Definición del problema.

El tipo de fisura se ha adoptado atendiendo a la forma típica que presentan las desarrolladas por fatiga o corrosión bajo tensión. Son fisuras de superficie con forma de lúnula cuyo borde se asimila a una elipse, tal como muestra la figura 1. Con esta representación la fisura queda determinada por dos dimensiones características, las longitudes de los semiejes de la elipse y el problema de establecer la condición de rotura se reduce a determinar la relación entre los valores de las dimensiones de la fisura, la sollicitación aplicada y el diámetro del alambre que originan la rotura de éste. De acuerdo con la notación empleada en la figura 2, dicha relación, formulada analíticamente, sería una ecuación del tipo

$$f(\sigma, a, c, D) = 0 \quad (1)$$

2.2.- Criterios de fractura

El criterio de fractura basado en el factor de intensidad de tensiones K es aplicable a casos de sollicitación en modo puro, como el que aquí se estudia, y establece que la fractura tiene lugar cuando dicho factor alcanza un valor crítico K_c , propio del material. Esta formulación clásica del criterio corresponde a problemas bidimensionales en los cuales el factor K es uniforme a lo largo del borde de la fisura, pero en problemas tridimensionales K varía de un punto a otro y el criterio debe modificarse atendiendo a esta circunstancia. Una generalización directa lleva a la conclusión de que debe ser el máximo valor de K en el borde de la fisura el que alcance el valor crítico K_c .

Para el problema del alambre fisurado, el criterio del factor de intensidad de tensiones se aplicará bajo esta forma, utilizando los resultados de M.A. Astiz /4/. Astiz ha resuelto el complejo problema numérico de determinar el factor K a lo largo del borde de la fisura, empleando el método de los elementos finitos con un elemento singular original, en conjunción con la técnica de la rigidez diferencial. De acuerdo con sus resultados, para relaciones a/c menores de 0,9, el factor de intensidad de

tensiones es máximo en el punto más profundo de la fisura y su valor viene dado por la expresión:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a} M \left(\frac{a}{C}, \frac{a}{D} \right) \quad (2)$$

donde M es la función adimensional definida gráficamente en la figura 3. Igualando esta expresión de K al valor crítico K_c se obtiene la relación del tipo (1) correspondiente al criterio de fractura basado en el factor de intensidad de tensiones

$$\sigma\sqrt{\pi a} M \left(\frac{a}{C}, \frac{a}{D} \right) = K_c \quad (3)$$

El segundo criterio de fractura que se ha utilizado es igualmente conocido y se basa en un planteamiento energético: la energía absorbida para crear nueva superficie de fisura en el proceso de fractura procede de la energía liberada por el sólido y del trabajo de las fuerzas exteriores. Este criterio es equivalente al del factor de intensidad de tensiones en problemas bidimensionales pero no sucede así con problemas tridimensionales. En un caso como el que aquí se estudia, puede seguirse el mismo planteamiento, y considerando una propagación virtual de la fisura, con un incremento de área $d\Omega$, obtener en la siguiente expresión de la energía disponible G para crear una nueva unidad de área de fisura:

$$G = \frac{1}{2} (\sigma\pi \frac{D^2}{4})^2 \frac{dC}{d\Omega} \quad (4)$$

donde dC es la variación que experimentaría la elongabilidad del alambre -- con el crecimiento virtual de la fisura. La condición de fractura es que la energía disponible para propagar la fisura G, iguale a la energía necesaria para rasgar el material G_c , pero contrariamente a lo que sucede en los casos bidimensionales, la forma que adopta la fisura al propagarse, no es conocida a priori y la expresión (4) no puede ser calculada sin introducir alguna hipótesis al respecto.

La solución adoptada para el problema del alambre fisurado viene sugerida por la limitada sensibilidad que la elongabilidad del alambre muestra respecto a la curvatura del borde de la fisura, tal como aparece reflejado en la figura 4 /5/, donde se comparan diferentes valores de la elongabilidad en función de la profundidad de fisura. La línea llena corresponde a fisuras con borde recto, obtenidos numéricamente mediante el método de elementos finitos, mientras que los puntos son valores determinados experimentalmente utilizando probetas fisuradas de acero y de resina epoxi con bordes de diferentes curvaturas. Como puede apreciarse, a pesar de su dispar procedencia, los resultados tienden a agruparse en una única curva, confirmando así que es la profundidad de fisura el parámetro determinante de la elongabilidad del alambre. En consonancia con este dato, el cálculo de la magnitud G según la ecuación (4), se ha realizado asimilando la fisura real a una de borde recto e igual profundidad.

El resultado obtenido permite, de modo directo, expresar analíticamente la condición de rotura:

$$\sigma\sqrt{\pi a} \{0,473 - 3,286 \frac{a}{D} + 14,797 (\frac{a}{D})^2\}^{1/2} / \{ \frac{a}{D} - (\frac{a}{D})^2 \}^{1/4} = \sqrt{EG} = \sqrt{EG}_c \quad (5)$$

El tercer y último criterio de fractura utilizado se fundamenta en el crecimiento inestable del COD para un valor límite de la sollicitación aplicada, y parte de una expresión modificada /6/ del COD correspondiente a una placa infinita. La condición resultante, denominada criterio de la tensión de cedencia, ha sido utilizada para predecir satisfactoriamente presiones de rotura en tuberías con fisuras pasantes /6,7/ y no pasantes /7/. Su expresión analítica adopta, en general, la forma:

$$\sigma_M = \sigma_c \quad (6)$$

en la cual, para el caso de un alambre fisurado, σ representa la tensión nominal aplicada, M es el factor adimensional definido gráficamente en la figura 3, y σ_c una tensión de cedencia efectiva característica del material, intermedia entre el límite elástico y la resistencia a tracción.

3.- EXPERIMENTACION REALIZADA

La experimentación llevada a cabo comprende un total aproximado de 90 ensayos de fractura realizados con alambres de acero de pretensar y barras de acero de armar. En todos los casos el ensayo ha consistido en someter a tracción hasta rotura probetas previamente fisuradas por fatiga, registrándose como datos de ensayo la carga de rotura y las dimensiones de la fisura de fatiga. Estas últimas se han medido sobre la superficie de fractura en un proyector de perfiles, habiéndose obtenido valores de las relaciones a/D y a/c comprendidos en los intervalos 0,2 - 0,5 y 0,4 - 0,9 respectivamente.

El número de materiales diferentes que han sido estudiados es de ocho, seis comerciales y dos de laboratorio, distribuidos del siguiente modo:

- Un acero de armar comercial de dureza natural, de 12 mm. de diámetro (Acero 1).
- Tres aceros de pretensar trefilados de 7 mm. de diámetro (Aceros 2, 3 y 4)
- Dos aceros de pretensar templados y revenidos de 7 y 9 mm. de diámetro, respectivamente (Aceros 5 y 6).
- Un acero de pretensar trefilado de 7 mm. de diámetro, ensayado a -165°C (Acero 7).
- Un acero de pretensar trefilado de 7 mm. de diámetro, endurecido por deformación (Acero 8).

4.- ANALISIS DE RESULTADOS

Para facilitar la interpretación de los resultados en relación a los objetivos establecidos, se ha elaborado la Tabla 1. En ella, además de incluir el alargamiento bajo carga máxima como índice de ductilidad, se recoge para cada material estudiado la desviación típica de los parámetros de fractura que define cada uno de los criterios considerados, en las ecuaciones (3), (5) y (6) respectivamente. Según dichas ecuaciones el valor de esos parámetros debe ser característico del material, por lo que su desviación típica, expresada como porcentaje del valor medio, es un adecuado exponente para determinar la validez de un criterio de fractura.

En la Tabla 1 se ha enmarcado la desviación mínima correspondiente a cada acero, para indicar el criterio de fractura que refleja mejor el comportamiento del material y proporciona predicciones más fiables. Observando la Tabla se aprecian además tres datos significativos:

- Ninguno de los valores enmarcados es superior al 10% que generalmente se acepta como desviación límite de un parámetro de fractura.
- Los aceros del mismo tipo están gobernados por el mismo criterio de fractura.
- El modelo teórico de material correspondiente a cada criterio de fractura está en consonancia con los materiales que obedecen el criterio, de acuerdo con su ductilidad. En este sentido destaca el caso del acero trefilado cuando se ensaya endurecido a -165°C . Ambas circunstancias refuerzan

zan el comportamiento elástico-lineal y en efecto, pasa de estar regido por un criterio elástico-lineal global a estarlo por un criterio elástico-lineal local.

TABLA 1 - Resumen de resultados

Material	Ductilidad	K_c	\sqrt{EG}_c	σ_c
Acero 1	12%	15%	21%	5%
Acero 2	6%	5%	4%	8%
Acero 3	6%	7%	6%	19%
Acero 4	7%	10%	8%	9%
Acero 5	6%	10%	12%	22%
Acero 6	7%	8%	18%	14%
Acero 7	4%	7%	8%	13%
Acero 8	3%	5%	9%	10%

5.- CONCLUSIONES

Las conclusiones que se derivan del análisis de resultados son básicamente, las siguientes:

- Desde el punto de vista de la Mecánica de Fractura se aportan los datos experimentales que confirman la validez de tres criterios de fractura generalizados a problemas tridimensionales.
- Respecto al problema de la presencia de fisuras en armaduras para estructuras de hormigón se ha establecido qué criterios rigen la fractura de los aceros estudiados, permitiendo con ello predecir la carga de rotura de una armadura fisurada. Para generalizar estas conclusiones a cualquier acero de armaduras sería necesaria, en principio, una experimentación más exhaustiva, pero las características que presentan los resultados obtenidos, puestas de manifiesto en el análisis de los mismos, constituyen una primera confirmación en ese sentido.
- En cuanto al conocimiento de los aceros de armaduras se han determinado magnitudes que permiten caracterizar su resistencia a fractura. En el caso de los aceros de pretensar trefilados, el valor de \sqrt{EG}_c permite estimar su tenacidad de fractura entre 90 y 100 MPa \sqrt{m} y en el de los templados y revenidos, del valor K_c se deduce que la tenacidad de fractura varía entre 70 y 100 MPa \sqrt{m} .

REFERENCIAS

- /1/ Elices, M. y Sánchez-Gálvez, V. Hormigón y Acero, n°125, pp. 85-99, 1977.
- /2/ Elices, M. Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, pp. 21-31 n°extraordinario 1983.
- /3/ Elices, M. y Sleigh, G. Hormigón y Acero, n°127, pp. 97-109, 1978.
- /4/ Astiz, M.A. International Journal of Fracture. Aceptado para publicación.
- /5/ Valiente, A. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1980.
- /6/ Hahn, G.T., Sarrate, M. y Rosenfield, A.R. International Journal of Fracture Mechanics, n°5, pp. 187-210, 1969.
- /7/ Elices, M. y otros. V Asamblea General del CENIM, comunicación T-19. 1980.

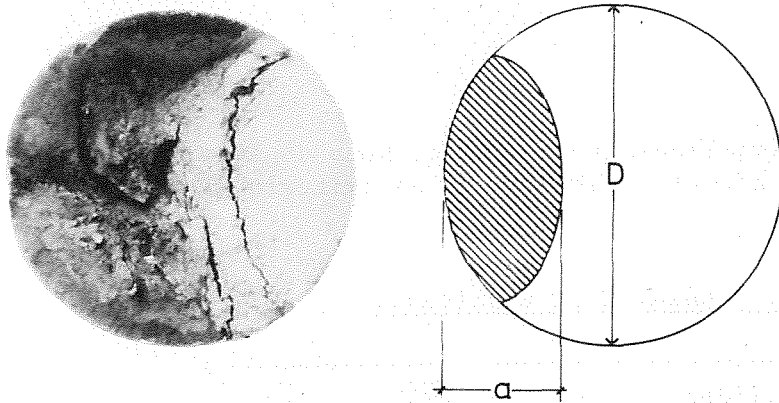


Fig.1.- Representación geométrica de una fisura.

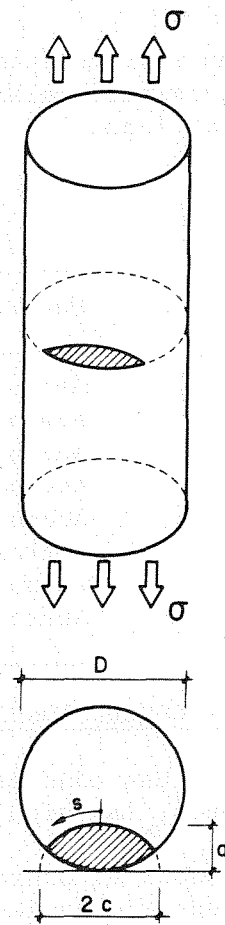


Fig.2.- Definición del problema en estudio.

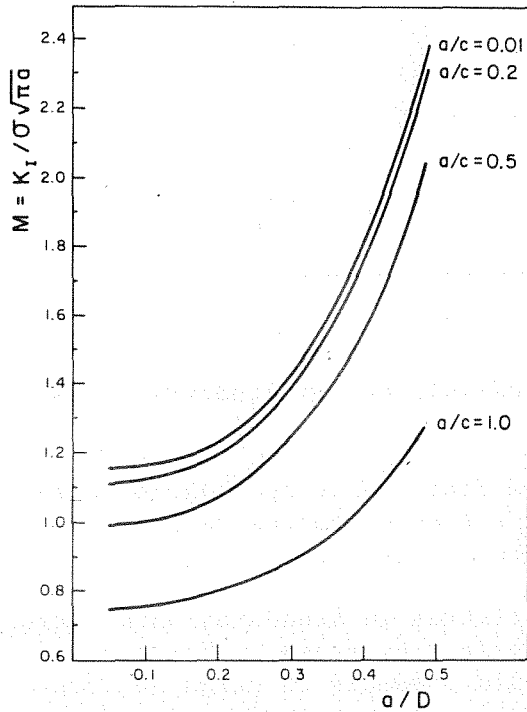


Fig.3.- Abacos adimensionales del factor K_I .

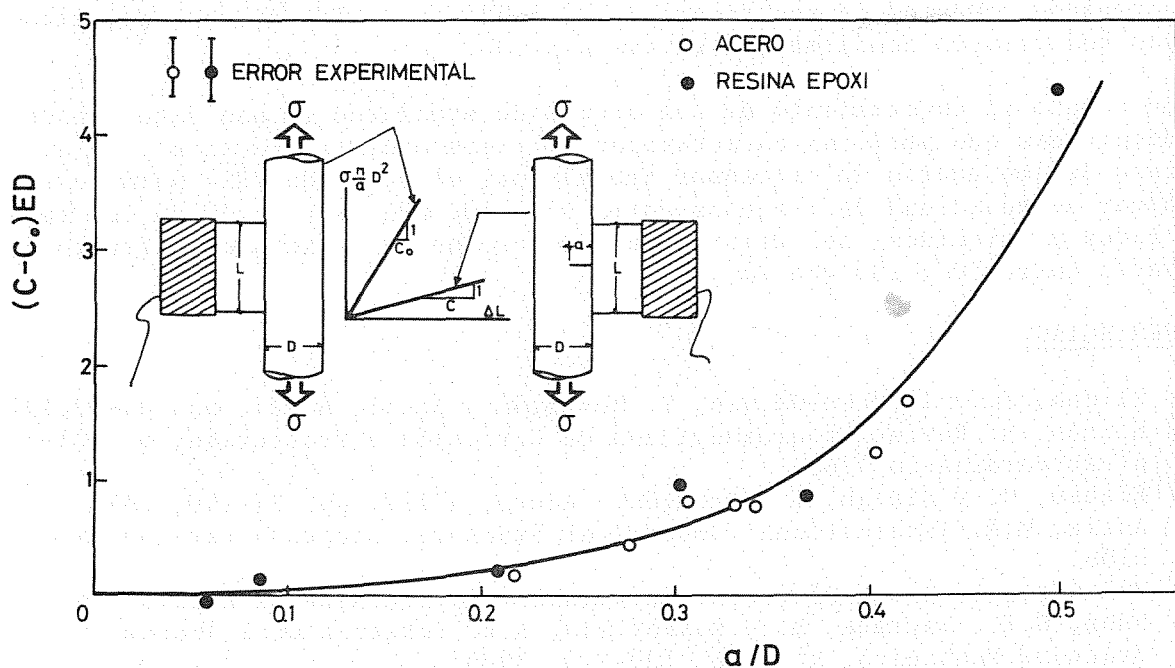


Fig.4.- Elongabilidad de alambres fisurados.