

PARADA DE FISURA EN CORROSIÓN BAJO TENSIÓN. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LA FLEXIBILIDAD.

J. Sánchez, C. Andrade, J. Fulla

Departamento de Químico-Física de los Materiales de Construcción, Instituto de Ciencias de la Construcción
"Eduardo Torroja" (CSIC)
Serrano Galvache, 4, 28033 Madrid, España.
E-mail: javiersm@ietcc.csic.es, andrade@ietcc.csic.es, fulla@ietcc.csic.es

RESUMEN

El mecanismo por el cual se produce el deterioro por Corrosión Bajo Tensión (SCC) no ha sido explicado de forma satisfactoria hasta el momento. Se trata de un proceso sinérgico en el que interviene la corrosión y las tensiones mecánicas, pero donde la consecuencia más importante es que se puede modificar el comportamiento mecánico del material dando lugar a roturas frágiles.

Esta investigación se ha llevado a cabo en aceros de pretensado y el método de trabajo se ha diseñado para determinar el por qué, en los primeros momentos de crecimiento de la fisura, ésta puede pararse o seguir creciendo. Es decir, algunas fisuras se inician y no continúan creciendo, mientras que otras avanzan y llegan a producir la rotura. Se ha estudiado la respuesta electroquímica durante la iniciación y crecimiento de las fisuras, y se han evaluado los efectos de los parámetros mecánicos durante la propagación de las fisuras. La velocidad de crecimiento de la fisura se ha determinado midiendo el desplazamiento y empleando el Método de la Flexibilidad para obtener la profundidad de la fisura.

ABSTRACT

The stress corrosion cracking (SCC) process that occurs in metals is at present a not fully elucidated mechanism of deterioration. It is a surface process that implies a corrosion and stress synergy, but the most practical consequence is that stress corrosion cracking can modify the mechanical characteristics of the metal causing brittle failure.

This research deals with steels used in prestressed concrete and is designed to determine why, in the early stages of the crack, this can stop or continue. That is, some cracks initiation and don't continue to grow, while others advance and cause failure. The electrochemical response has been studied as cracks initiation and grows, and the effects of mechanical parameters on crack propagation were evaluated. Crack growth was determined by measuring crack opening displacement and using the Flexibility Method to obtain crack depth.

PALABRAS CLAVE: Corrosión Bajo Tensión, Acero Alta Resistencia, Método de la Flexibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Las armaduras empleadas en estructuras pre o postensadas son susceptibles de sufrir Corrosión Bajo Tensión (SCC), que se desarrolla de forma inesperada y que puede producir fallos de dramáticas consecuencias [1]. Estas armaduras tienen una composición eutéctoides y son trabajadas en frío. A pesar de que el mecanismo de SCC no ha sido explicado de forma satisfactoria, para que los fallos ocurran es necesario que las armaduras se encuentren en contacto con medios en los que sean susceptibles a la corrosión y bajo tensión mecánica. En el caso de las estructuras de hormigón, el electrolito es el que se encuentra presente en los poros del hormigón y los niveles tensionales son los que soporta la estructura.

Existen diferentes métodos de ensayos para estudiar la susceptibilidad a la SCC [2,3]. Algunos parten del material sin defectos previos y tratan de lograr el crecimiento de la fisura o alcanzar la rotura bajo determinadas condiciones mecánicas y electroquímicas. Otros métodos parten de un material dañado previamente, ya sea por fatiga o produciendo una entalla. Las fisuras generadas a través de los diferentes métodos van a alcanzar diferentes tamaños y formas en función de las condiciones del ensayo.

El comportamiento de los aceros eutéctoides empleados como armaduras en estructuras pre o postensadas ha sido objeto de diversos estudios [2-4] sin embargo su comportamiento no se puede predecir con precisión. Una de las principales dificultades reside en simular el medio en el que el acero se encuentra en una estructura

de hormigón. Los primeros estudios realizados en el marco de un comité de la Federación Internacional del Pretensado (FIP-78) [5] ni siquiera tratan de simular el hormigón, sino de reproducir el mismo tipo de fractura [2,6]. En estudios posteriores se usan probetas embebidas en morteros [7] y también ensayos en los que se emplea una solución acuosa con pasta de cemento endurecido y triturado [8]. Parkins [9,10] realiza experimentos en soluciones de bicarbonato a diferentes valores de pH en aceros ferríticos C-Mn, que podrían ser extrapolables al caso del hormigón. Alonso y Andrade [11] realizan un estudio electroquímico de los aceros de pretensado y de los corrugados en diversas disoluciones de $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$, como medio que simula la composición del electrolito que se encuentra en los poros del hormigón carbonatado. Finalmente, Caballero y col. [12] realizan un estudio de la susceptibilidad de los aceros templados y revenidos en soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

El empleo de probetas prefisuradas tiene la ventaja de eliminar la etapa de incubación de la fisura, pero presenta el inconveniente de que la fisura generada por fatiga puede alterar el campo de tensiones y deformaciones en el fondo de la fisura. La plastificación del fondo de la fisura durante la generación de la misma por fatiga provoca un aumento de la resistencia a la corrosión bajo tensión. Toribio, Lancha y Elices [13,14] muestran la influencia del máximo factor de intensidad de tensiones alcanzado en la generación de la fisura por fatiga sobre la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión.

En este sentido se ha establecido un método de ensayo que no modifica el comportamiento mecánico del material y que permite recoger la mayor cantidad de información posible, generando las fisuras de un modo más realista [4]. El presente estudio trata de explicar el fenómeno de la parada de la fisura en el proceso de SCC. Para ello se han observado los parámetros que controlan el crecimiento de la fisura y se ha aplicado el Método de la Flexibilidad [15] para determinar la profundidad de la fisura en tiempo real.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

El material empleado en este estudio es un acero trefilado comercial, de composición eutécticoide [4].

El método de ensayo [4,16] combina la medida de parámetros mecánicos y electroquímicos, y se lleva a cabo a través de los siguientes pasos:

1. Se pone en contacto el acero con la disolución. Se fija el potencial electroquímico y se registra la intensidad de la corriente que circula por la celda. Al mismo tiempo el acero se encuentra a carga constante. Durante esta etapa se produce el crecimiento de la fisura. Posteriormente, se extrae la probeta y se seca.
2. Se realiza un ensayo de tracción al aire. A través de este ensayo se pueden obtener los

parámetros mecánicos, como la tenacidad de fractura del acero.

3. Análisis de la superficie de fractura en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). A través de este estudio se puede determinar el tamaño de la fisura, la existencia o no de zonas frágiles, la reducción de área, la presencia y tipos de óxidos, etc.

Para llevar a cabo los ensayos de SCC se acopla una celda electroquímica a la máquina de tracción, celda que permite controlar la temperatura. Se ha diseñado un extensómetro que permite sortear la celda de SCC.

2.1. Cálculos Teóricos

Se han realizado cálculos de Elementos Finitos para establecer la rigidez de una barra cilíndrica en función de diferentes tamaños de fisuras superficiales. Esto permite estimar la velocidad de propagación de la fisura durante el ensayo de SCC a través de la deformación de la barra, la cual se encuentra sometida a carga constante. Para llevar a cabo los cálculos se han empleado dos programas comerciales, ABAQUS [17] y COMSOL [18]. Los cálculos se han realizado teniendo en cuenta el comportamiento elasto-plástico de este material.

2.2. Ensayos de SCC

Las condiciones de ensayo son las siguientes:

- Carga constante, variándose de unos ensayos a otros, pero siempre dentro del límite elástico. Las probetas se encuentran recubiertas con resinas epoxi y entalladas.
- Solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y 0.05M NaCl.
- Potencial electroquímico controlado, $275\text{mV}_{\text{Ag}/\text{AgCl}}$.
- Temperatura constante de 25 °C.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la figura 1 se muestra la evolución de la intensidad de corriente durante el ensayo de SCC para 4 probetas. En las figuras 1a y 1b la corriente se mantiene anódica durante las primeras horas, después cae a valores cerca de cero o catódicos. En las figuras 1c y 1d la intensidad de celda se mantiene en valores anódicos durante todo el ensayo, en un caso con valores bajos de intensidad y en otro con valores más elevados.

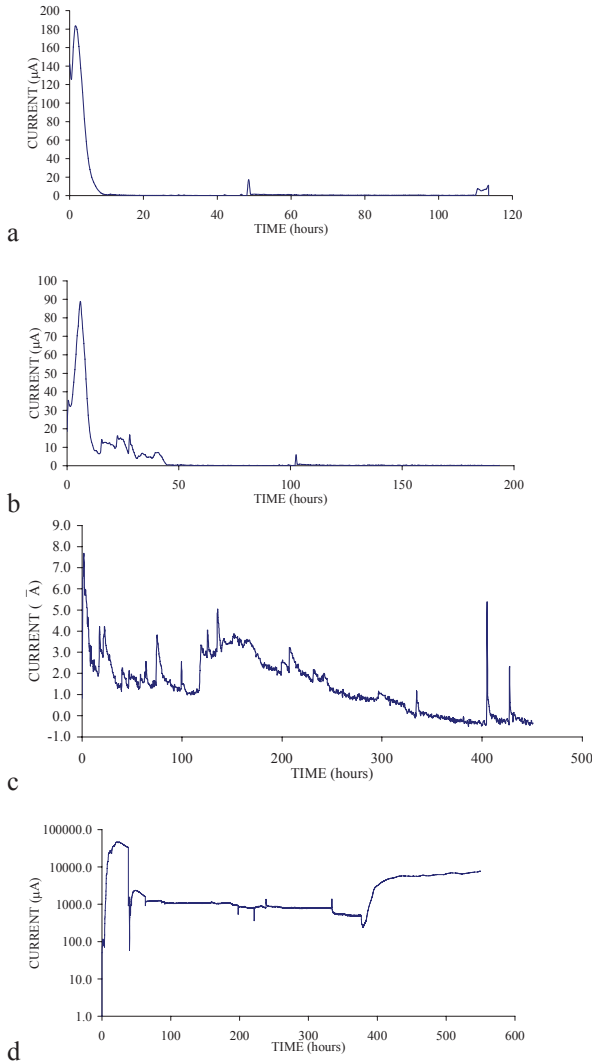


Figura 1. Intensidad de corriente de celda durante el ensayo de SCC para los aceros a, b, c y d.

En la figura 2 se muestra la superficie de fractura, examinada en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). En la figura 2a se puede observar la entalla y la fisura generada a partir de ésta por SCC. En la superficie de la entalla se puede observar la presencia de óxidos como consecuencia de la corriente anódica (figura 2b). La entalla produce una concentración de tensiones y localiza el crecimiento de la fisura por SCC (figura 2c). Finalmente, en la superficie de fractura se pueden distinguir las facetas de clivaje generadas durante el ensayo al aire (figura 2d).

El ensayo de SCC se realizó a carga constante, lo cual permite estimar el tamaño de la fisura en tiempo real empleando el Método de la Flexibilidad [15]. En la figura 3 se muestra la evolución del desplazamiento del extensómetro durante el ensayo. El Método de la Flexibilidad permite establecer el tamaño de la fisura a través de la siguiente expresión:

$$u(a) = P \cdot C(a) \tag{1}$$

Donde: u es el alargamiento del acero, a es el tamaño de la fisura, P es la carga aplicada y C es la rigidez.

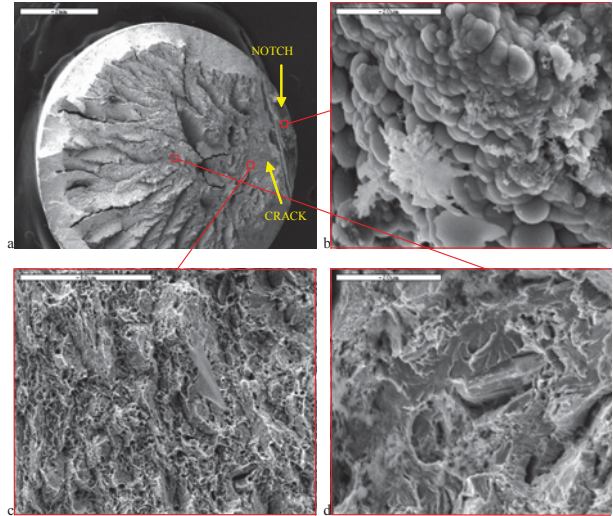


Figura 2. Superficie de fractura después del ensayo de SCC: a) superficie de fractura, b) óxidos formados en la entalla, c) superficie de la fisura generada por SCC, y d) facetas de clivaje la zona de rotura al aire.

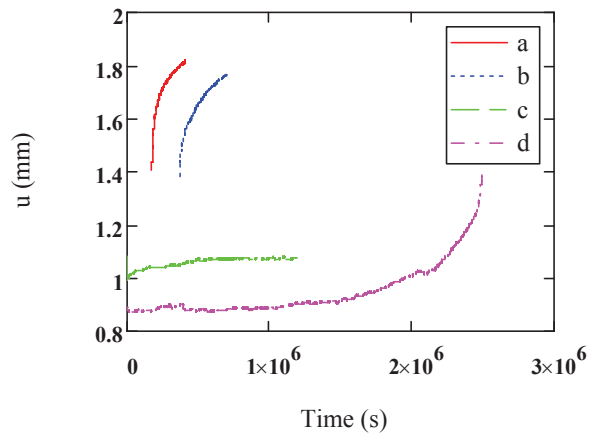


Figura 3. Alargamiento durante el ensayo de SCC.

Para establecer la función $C(a)$ para una barra con una fisura superficial se ha realizado un análisis por elementos finitos. Se han empleado dos programas comerciales, ABAQUS y COMSOL. Debido a la simetría, se ha realizado la simulación de una cuarta parte de la barra. Se ha tenido en cuenta el comportamiento elasto-plástico del acero trefilado. En cuanto al aspecto de la fisura, se ha mantenido en todos los casos el semi-ancho, incrementándose únicamente la profundidad, como se ha observado en los ensayos de SCC [4,16]. A partir de las simulaciones se ha obtenido el desplazamiento, u_B , para un plano situado a una distancia B de la fisura, en función del tamaño de la fisura y de la carga remota aplicada. En la figura 4 se muestra la variación de la rigidez en función del tamaño de la fisura. De esta forma es posible estimar el tamaño de la fisura a partir de los parámetros mecánicos obtenidos en tiempo real, según la ecuación 2.

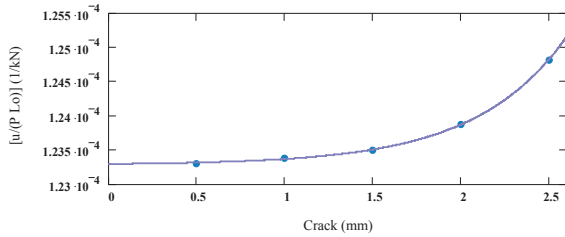


Figura 4. Variación de la rigidez en función del tamaño de la fisura.

$$\frac{u}{(P * L_0)} = 1.466 * 10^{-8} * e^{1.862 * a} + 1.233 * 10^{-4} \quad (2)$$

Donde u es el desplazamiento para un extensómetro de longitud L₀.

4. DISCUSIÓN

A través de la estimación de la rigidez de la probeta es posible calcular la velocidad de propagación de la fisura (CPR) durante el ensayo de SCC, y correlacionarla con parámetros electroquímicos y mecánicos. En la figura 5 se muestra la CPR en función del tamaño de la fisura. En esta figura se pueden observar dos tipos de comportamientos; la parada de la fisura para los casos a, b y c, y un crecimiento mantenido de la fisura para el caso d.

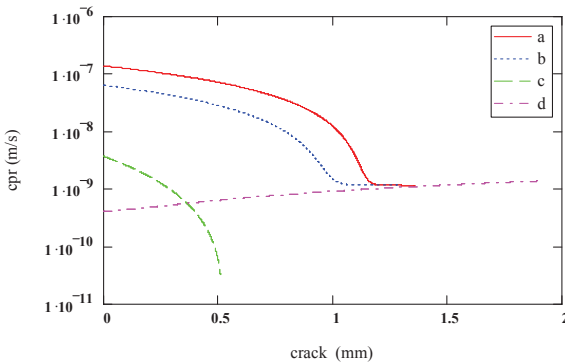


Figura 5. Velocidad de propagación de la fisura.

Para explicar los resultados obtenidos y los derivados de la figura 5, se han analizado tres tipos de variables:

- Una variable electroquímica: la intensidad de corriente de celda.
- Una variable mecánica: la concentración de tensiones en el fondo de la fisura.
- Una variable geométrica: la relación de aspecto de la fisura a/b (= longitud/semiancho).

4.1. Corriente de celda durante el ensayo de SCC

La intensidad de corriente representada con valores positivos representa la intensidad anódica, y los valores negativos se corresponden con la catódica. En el caso de los ensayos a y b, la corriente de celda cae a valores igual a cero después de pocas horas. Este momento en el que la intensidad cae a cero se corresponde con la parada del crecimiento de la fisura. En el caso de la probeta c, la corriente se mantiene anódica a pesar de

producirse la parada de la fisura. En el caso de la probeta d, el ensayo se llevo a cabo al nivel de carga más bajo de todos los realizados, lo cual se traduce en una velocidad de crecimiento más pequeña, pero en un tamaño mayor de fisura. La intensidad de corriente se mantiene anódica durante todo el ensayo.

Por lo tanto, para que se produzca el crecimiento de la fisura es condición necesaria, pero no suficiente, que exista una intensidad de corriente anódica para que se produzca la propagación de la fisura por SCC.

4.2. Concentración de tensiones en el fondo de la fisura

Toribio et al. [13] muestran la influencia de las condiciones de generación de la fisura previa por fatiga sobre la velocidad de propagación de la fisura por SCC. La plastificación de la sección resistente genera tensiones de compresión en el fondo de la fisura, lo cual provoca la reducción de la velocidad de propagación o la parada de la fisura.

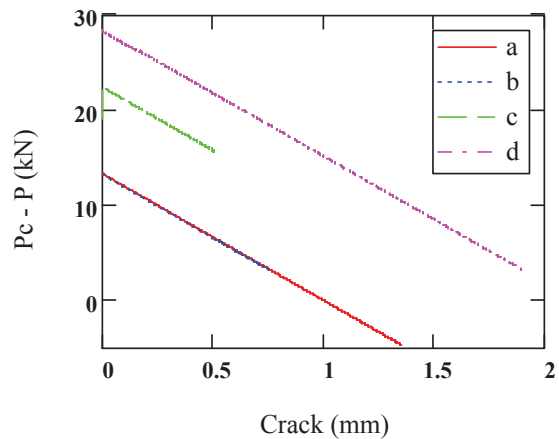


Figura 6. Carga de plastificación de la sección resistente en función del tamaño de la fisura.

A partir de los cálculos FEM es posible observar un cambio en la rigidez cuando se alcanza una carga externa que provoca una plastificación de la sección resistente, carga que se va a denominar Pc, que depende del tamaño de la fisura. Si se representa la diferencia entre la carga aplicada y la de plastificación (Pc) en función del tamaño de la fisura durante el ensayo de SCC (figura 6), se puede observar que únicamente el ensayo a supera la carga Pc. En este ensayo, se ha estimado que se supera la carga Pc para un tamaño de fisura de 1mm. Si se observa de nuevo la figura 5, se puede apreciar que se produce una disminución de más de un orden de magnitud de la velocidad de propagación de la fisura en este momento.

4.3. Relación de aspecto de la fisura

Otro parámetro que se ha tenido en cuenta es el gradiente de tensiones en la superficie de la fisura. De acuerdo al modelo de SCC planteado en trabajos

anteriores [4,16], las vacantes se generan por disolución anódica en la entalla y difunden dirigidas por el gradiente de tensiones hacia el frente de la fisura. Es decir, el gradiente de tensiones modifica el coeficiente de difusión de las vacantes en la superficie de la fisura y, por lo tanto, modifica la velocidad de propagación de la fisura.

Se ha realizado un estudio de las tensiones existentes en la superficie a través de cálculos FEM. Se ha estudiado el gradiente de tensiones para fisuras de diferentes tamaños y diversos aspectos. En la figura 7 se muestran varios perfiles de tensiones en la superficie de la fisura a medida que esta crece, manteniéndose el semiancho b fijo. El frente de la fisura se sitúa en el origen del eje de abscisas. Se puede observar que para fisuras con una relación de aspecto $a/b < 1$, el gradiente de tensiones se mantiene positivo. Sin embargo, para $a/b > 1$ se genera un máximo de tensiones cerca del frente de la fisura dando lugar a un gradiente negativo de tensiones. De acuerdo a los estudios anteriores [4,16], la velocidad de propagación de la fisura debería disminuir o desaparecer al generarse este máximo en la superficie de la fisura, ya que desaparece la fuerza impulsora que dirige las vacantes.

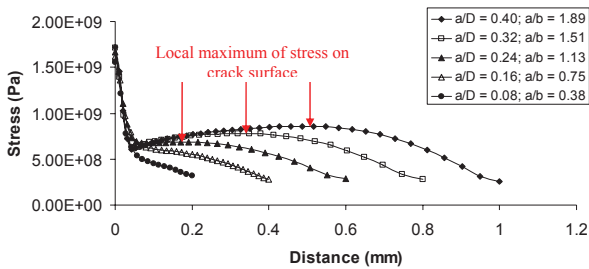


Figura 7. Tensión en la superficie de la fisura. El frente de la fisura está situado en 0mm.

Este efecto se puede observar en la probeta b. La velocidad de propagación de la fisura disminuye dos órdenes de magnitud cuando el aspecto de la fisura es $a/b \sim 1$ (figura 8).

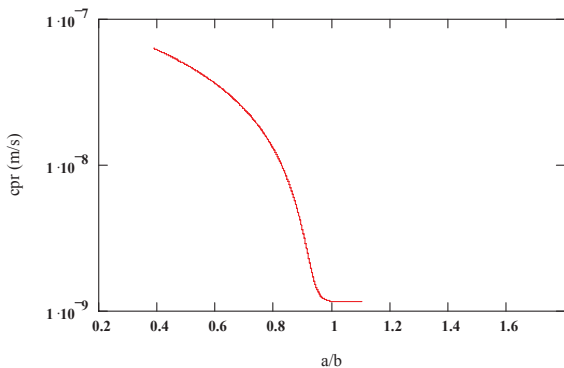


Figura 8. Probeta b. Velocidad de propagación de la fisura frente a la relación de aspecto.

Los resultados del presente estudio muestran la existencia de una relación entre variables electroquímicas y mecánicas. Los resultados muestran

la relación entre la corriente de celda y las tensiones generadas entorno a la fisura. La corriente es un indicador de la evolución de la fisura por SCC. En los casos en los que la corriente se mantiene anódica, la fisura puede propagar, mientras que en los casos en los que la intensidad cae a cero o pasa a ser catódica, se produce la parada de la fisura.

La corriente anódica es una condición necesaria pero no suficiente para que se desarrolle la fisura por SCC. Sin embargo, la velocidad de propagación de la fisura depende de las tensiones. Cuando se incrementa la carga externa, se produce un aumento en la velocidad de propagación, pero se puede alcanzar la parada de la fisura para tamaños de la misma menores. En trabajos previos [13] otros autores muestran la influencia de la plastificación del frente de la fisura sobre la velocidad de propagación. Este hecho puede explicar el por qué, en los ensayos realizados a cargas más elevadas, se produce la parada de la fisura para tamaños menores, ya que se alcanza la plastificación de la sección resistente y la consecuente parada de fisura. A su vez, la parada de la fisura queda reflejada en la caída o cambio de polaridad hacia valores catódicos de la corriente de celda durante el ensayo de SCC.

5. CONCLUSIONES

Partiendo de un método experimental desarrollado en trabajos previos, en la presente investigación se muestran los valores de velocidad de propagación de la fisura por SCC en aceros de alta resistencia empleados en estructuras pre o postensadas. Además de los parámetros mecánicos, el método de ensayo permite registrar la corriente de celda a potencial controlado y el tamaño de fisura frente al tiempo. Esta información permite identificar las variables críticas y su influencia sobre la propagación de la fisura por SCC.

El fenómeno de la parada de la fisura permite identificar qué parámetros controlan el proceso de SCC. El crecimiento de la fisura depende de factores electroquímicos, mecánicos y geométricos:

- Para que se mantenga el crecimiento de la fisura por SCC es una condición necesaria, pero no suficiente, que la corriente se mantenga anódica.
- La velocidad de propagación de la fisura se incrementa con el aumento de la tensión remota, sin embargo, se alcanza la parada de la fisura para tamaños menores de ésta ya que produce la plastificación de la sección resistente.
- Finalmente, el crecimiento de la fisura depende de su geometría.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia por la financiación recibida a través del proyecto MAT2003-03912, así como al proyecto INGENIO 2010-CONSOLIDER sobre “Seguridad y Durabilidad de Estructuras de Construcción: SEDUREC”.

REFERENCIAS

- [1] A Valiente, M Elices. Premature failure of prestressed steel bars. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 5, nº 3, pp. 219-227, 1998.
- [2] M Elices. Problemas de corrosión bajo tensión en el hormigón pretensado. I Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección, 1983.
- [3] J Fullea. Experimental methods to evaluate the susceptibility of prestressing steels to stress corrosion cracking, in: *Proceedings of the International Workshop on Failures of Post-tensioned Concrete Structures*. Messina, 2000.
- [4] J Sanchez, J Fullea, C Andrade, C Alonso. Stress corrosion cracking mechanism of prestressing steels in bicarbonate solutions. *Corrosion Science*, Vol. 49 (11), pp. 4069-4080, 2007.
- [5] M Elices, L Caballero, A Valiente, J Ruiz, A Martin. Hydrogen embrittlement of steels for prestressing concrete: The FIP and DIBt tests. *Corrosion*, Vol. 64, No. 2, pp. 164-174, 2008.
- [6] J Toribio, M Elices. Influence of residual stresses on hydrogen embrittlement susceptibility of prestressing steels. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 28 (6), pp. 791-803, 1991.
- [7] C Andrade, J A González. Potentiodynamic polarization curves and potentiostatic test at constant stress of steel wires embedded in hardened mortar. *Proceedings 3rd FIP Symposium*, 1981.
- [8] K F McGuin, M Elices. Stress corrosion resistance of transverse precracked prestressing tendons in tension. *British Corosion Journal*, Vol. 16 (4), pp. 187-195, 1981.
- [9] R N Parkins. Predictive approaches to stress corrosion cracking failure. *Corrosion Science*, Vol. 20, pp. 147-166, 1980.
- [10] R N Parkins, S Zhou. The stress corrosion cracking of C-Mn steel in CO_2 - HCO_3^- - CO_3^{2-} solutions. *Corrosion Science*, Vol. 39 (1), pp. 159-191, 1997.
- [11] C Alonso, C Andrade. The electrochemical behaviour of steel reinforcements in Na_2CO_3 and NaHCO_3 solutions in relation to stress corrosion cracking. *Corrosion Science*, Vol. 29 (9), pp. 1129-1139, 1989.
- [12] L Caballero, J Fullea, C Alonso, C Andrade. Environmentally assisted cracking of pearlitic steels in simulated carbonated concrete pore solutions. 15th Int. Corrosion Congress, Granada, 2002.
- [13] J Toribio, A M Lancha, M Elices. Factors influencing stress corrosion cracking of high strength pearlitic steels. *Corrosion Science*, Vol. 35 (4), pp. 521-530, 1993.
- [14] J Toribio. Relationship between microstructure and strength in eutectoid steels. *Materials Science and Engineering A* 387-389, pp. 227-230, 2004.
- [15] C Q Cai, C S Shin. A normalized area-compliance method for monitoring surface crack development in a cylindrical rod. *International Journal of Fatigue* 27, pp. 801-809, 2005.
- [16] J Sanchez, Ph.D. Thesis. Eduardo Torroja Institute, IETcc-CSIC, Spain, 2007.
- [17] ABAQUS 6.5.3 Student Edition, 2005.
- [18] COMSOL Multiphysics 3.2, 2006.