

# MEDIDAS DE PROPAGACION DE FISURAS POR CORROSION FATIGA EN AGUA DE MAR

V. Sánchez-Gálvez y A. Martín Sanz

*Departamento de Física y Física de Materiales. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.*

## RESUMEN

*Esta comunicación presenta algunos resultados de medidas de propagación de fisuras por corrosión fatiga en aceros de pretensado en agua de mar artificial. Se ha determinado el valor de  $K_{ISCC}$  y la influencia de la velocidad de deformación en este parámetro. Se han efectuado ensayos de corrosión fatiga con distintas frecuencias, formas de onda y valores del factor R. Se observa un crecimiento de las fisuras más rápido que en el aire a medida que disminuye la frecuencia y una reducción de la velocidad de crecimiento para velocidades bajas para valores de R pequeños, fenómeno este atribuido al cierre de la grieta.*

## SUMMARY

*This paper presents some results of corrosion fatigue crack growth measurements in prestressing steels in artificial sea water. The  $K_{ISCC}$  value has been determined as well as the influence of the strain rate on this parameter. Corrosion fatigue tests have been performed at different frequencies, waveforms and R values. The crack growth rate is faster than in air when the frequency is decreased, although the crack growth rate is reduced for low growth rates and low values of the stress ratio, this phenomenon being attributed to crack closure.*

## 1. INTRODUCCION

Se conoce como corrosión fatiga al fenómeno de nucleación y crecimiento de fisuras inducido por la acción combinada de una tensión mecánica oscilante y un medio ambiente no inerte. Se trata de un fenómeno sinérgico, es decir la acción conjunta de la oscilación de tensiones y del medio agresivo es más acusada que lo que cabría esperar de la simple superposición de estos fenómenos (fatiga y corrosión) por separado.

Es un hecho bien establecido que, a diferencia de la corrosión bajo tensión, todo ambiente no inerte es susceptible de producir corrosión fatiga entendiéndose tal efecto en el sentido de ocasionar una aceleración de la velocidad de crecimiento de las fisuras respecto de la velocidad que se observa en un medio inerte /1/. Cada medio ambiente, sin embargo, proporciona un efecto diferente, por lo que para cada aleación a estudiar es necesario medir la velocidad de crecimiento de las fisuras en cada uno de los posibles ambientes no inertes en que pueda encontrarse.

Asimismo se ha comprobado, que a diferencia de la fatiga en ambiente inerte, la velocidad de crecimiento de fisuras por corrosión fatiga se ve influenciada por la frecuencia de la onda, la forma de ésta y el factor de relación de cargas R (relación entre la tensión mínima y la máxima del ciclo), por lo que cualquier investigación en profundidad implica estudiar la influencia de todos estos factores /2/.

Esta comunicación presenta algunos de los primeros resultados de una investigación que se lleva a cabo para determinar la velocidad de propagación de fisuras de aceros de pretensar en agua de mar artificial.

## 2. OBTENCION DEL VALOR DE $K_{ISCC}$

En el estudio de la corrosión fatiga, un parámetro fundamental es el valor de  $K_{ISCC}$ , es decir el umbral del factor de intensidad de tensiones por debajo del cual no existe propagación de la fisura a carga constante en el medio ambiente considerado.

El acero utilizado en los ensayos es un acero de pretensado comercial de 7 mm. de diámetro. Es un acero eutectoide trefilado con estructura perlítica muy fina. Su composición química y propiedades mecánicas se recogen en la Tabla 1.

Los ensayos se realizan sobre probetas prefisuradas por fatiga utilizándose como parámetro de medida de la influencia del ambiente la relación entre la carga de rotura en el medio y la carga de rotura en el aire para una fisura de igual tamaño. Evidentemente tal relación coincide con la relación entre el valor del factor de intensidad de tensiones crítico en el medio y el valor de la tenacidad de fractura del acero en el aire  $K_{IC}$ .

Los primeros ensayos realizados han sido ensayos de tracción lenta, es decir ensayos a velocidad de deformación constante, según el procedimiento descrito por Parkins /3/. Se han realizado ensayos a  $\dot{\epsilon} = 3 \cdot 10^{-5}$  mm/s en agua de mar artificial según norma ASTM /4/ y a distintos potenciales, obteniéndose la curva que muestra la figura 1. Como puede verse, existen dos regiones en las que el acero presenta susceptibilidad al ambiente. Por debajo de aproximadamente -800 mV respecto del electrodo patrón de calomelanos y por encima de -600 mV(SCE) aproximadamente, existiendo una región intermedia de práctica inmunidad. La primera región corresponde con la zona de descarga de hidrógeno, por lo que cabe esperar que el mecanismo de fisuración en esa región sea fundamentalmente de fragilización por hidrógeno, mientras que

la segunda región probablemente corresponda con mecanismos de disolución anódica selectiva. Dado que el potencial libre de corrosión para esta solución se encuentra en torno a los -600 mV (SCE) es ésta la región que se ha estudiado.

El siguiente paso en la determinación del valor de  $K_{ISCC}$  ha sido la realización de ensayos a carga constante. La figura 2 muestra los resultados obtenidos para el potencial libre de corrosión. Ensayos realizados a potencial constante de -600 mV (SCE) son prácticamente coincidentes. Como puede observarse, el valor de  $K_{ISCC}$  para el potencial libre de corrosión se encuentra en torno al 65% de  $K_{IC}$ , confirmando la influencia del ambiente en la fisuración del acero.

El siguiente paso ha consistido en el estudio de la influencia de la velocidad de deformación en el valor crítico del factor de intensidad de tensiones. Se han realizado ensayos de tracción lenta con distintas velocidades de deformación a potencial constante de -600 mV (SCE). Como puede observarse en la figura 3, existe un intervalo de velocidades de deformación para las que el factor de intensidad de tensiones de rotura es inferior a  $K_{ISCC}$ , habiéndose obtenido valores en torno al 40% de  $K_{IC}$ . Este hecho observado con anterioridad para otras soluciones /5/ es una muestra de la importancia de la velocidad de deformación en la región de fisuración producida por disolución anódica selectiva y es un indicio de que en dicha región probablemente aparecerá el fenómeno de corrosión fatiga.

### 3. ENSAYOS DE CORROSION FATIGA

La medida de la propagación de fisuras por corrosión fatiga se ha realizado utilizando el método de la medida continua de la flexibilidad ("compliance") de la probeta y por medio de una curva de calibración flexibilidad-profundidad de la fisura se ha determinado ésta de forma continua a lo largo del ensayo. El procedimiento experimental ha sido descrito con anterioridad /6/.

Todos los ensayos se han realizado utilizando probetas prefisuradas por fatiga y aplicando un ciclo de carga axial constante con distintas frecuencias, formas de onda y valores del factor R. Los ensayos se han efectuado a potencial libre de corrosión, es decir en torno a los -600 mV (SCE) para el cual como ya se ha indicado cabe esperar aparezca el fenómeno de corrosión fatiga.

Las figuras 4 y 5 muestran los resultados de los ensayos de corrosión fatiga, velocidad de crecimiento de la fisura  $da/dN$  frente a intervalo del factor de intensidad de tensiones  $\Delta K$  para  $R < 0,1$  y distintas frecuencias con ondas triangular y sinusoidal respectivamente. A efectos de comparación también se muestra en la figura con línea de trazos la ley de Paris - que mejor se ajusta a los resultados de ensayos de fatiga en el aire así como la banda (en línea continua) en la que se sitúan el 95% de los resultados de fatiga en el aire. Asimismo, se ha situado en ambas figuras el valor de  $K_{ISCC}$  obtenido anteriormente en ensayos de carga constante. Como puede comprobarse, los valores de  $\Delta K$  (aproximadamente iguales a  $K_{max}$  ya que  $R < 0,1$ ) se encuentran por debajo de  $K_{ISCC}$  y sin embargo se observa un aumento de la velocidad de propagación de la  $K_{ISCC}$  fisura respecto de la velocidad en el aire, es decir se confirma la existencia de corrosión fatiga verdadera - para este acero y este medio. También se observa que el fenómeno es inexistente para frecuencia de 10 Hz y aparece tanto más acusado cuanto menor es la frecuencia del ensayo, resultado éste típico de corrosión fatiga y que ha sido comprobado en numerosas aleaciones con anterioridad.

Finalmente, puede verse que para velocidades de crecimiento de la fisura reducidas aparece un retardo en la velocidad de crecimiento que puede --

llegar a ser incluso inferior al valor correspondiente en el aire para el mismo valor de  $\Delta K$ . Este fenómeno pensamos pueda ser debido a un proceso de cierre de la grieta ("crack closure") durante el tramo de descarga del ciclo ocasionado por la presencia de productos de corrosión en el fondo de la fisura. Si ésta es la explicación de este fenómeno debe desaparecer para ensayos realizados con valores mayores de R /7/. En efecto, como puede verse en la figura 6, que representa los resultados de ensayos realizados con onda sinusoidal, frecuencia de 0,1 Hz y distintos valores de R, se comprueba la desaparición del fenómeno de retardo para R = 0,8, por lo que cabe esperar que éste sea debido al fenómeno de cierre de la grieta.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la existencia de corrosión fatiga verdadera ( $K_{\max} < K_{ISCC}$ ) en aceros de pretensar en agua de mar artificial para potencial libre de corrosión.

El fenómeno es tanto más acusado cuanto menor es la frecuencia del ciclo encontrándose valores de la velocidad de crecimiento de la fisura entre 2 y 4 veces superiores al valor medio de la velocidad en el aire para frecuencias de 0,1 Hz.

Para velocidades de crecimiento de la fisura pequeñas, se observa un retraso en dicha velocidad de propagación que llega a ser inferior incluso a la velocidad medida en el aire, fenómeno éste que se atribuye al cierre de la grieta ("crack closure"), argumento que se ve apoyado por cuanto deja de observarse para valores altos de la relación de cargas R.

#### REFERENCIAS

- /1/ Metal Science: Proceedings of the Conference: "Corrosion Fatigue" The Metals Society. Londres (1979).
- /2/ Rolfe, S.T. y Barsom, J.M. "Fracture and Fatigue Control in Structures" Prentice-Hall Inc. (1977).
- /3/ Parkins, R.N. "Stress corrosion cracking - the slow strain rate technique", 5 ASTM, STP 665 (1979).
- /4/ ASTM D1141: "Standard Specification for substitute Ocean Water"
- /5/ Parkins, R.N., Elices, M., Sánchez-Gálvez, V. y Caballero, L. "Environment Sensitive Cracking of Prestressing Steels", Corrosion Science, 22 pp. 379 (1982).
- /6/ Sánchez-Gálvez, V., Valiente, A. y Elices, M. "Corrosion-fatiga en alambre de alta resistencia". Rev. Ib. Corrosion y Protección, pp. 117 (1983)
- /7/ Van der Welden, R., Ewalds, H.L., Schultze, W.A. y Punter, A. "Corrosion Fatigue: Mechanics, Metallurgy, Electrochemistry and Engineering", ASTM STP 801, pp. 64 (1983).

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas del acero

C(%)	Mn (%)	Si(%)	P(%)	S(%)	N(%)
0,82	0,60	0,18	0,010	0,024	0,007
Módulo de elasticidad (MPa)	Límite Elástico 0,2% (MPa)	Tensión de rotura (MPa)	Tenacidad de fractura (MPa m <sup>1/2</sup> )	Alargamiento bajo carga máx. (%)	
204.379	1432	1668	119	5,8	

ENSAYOS A CARGA CONSTANTE

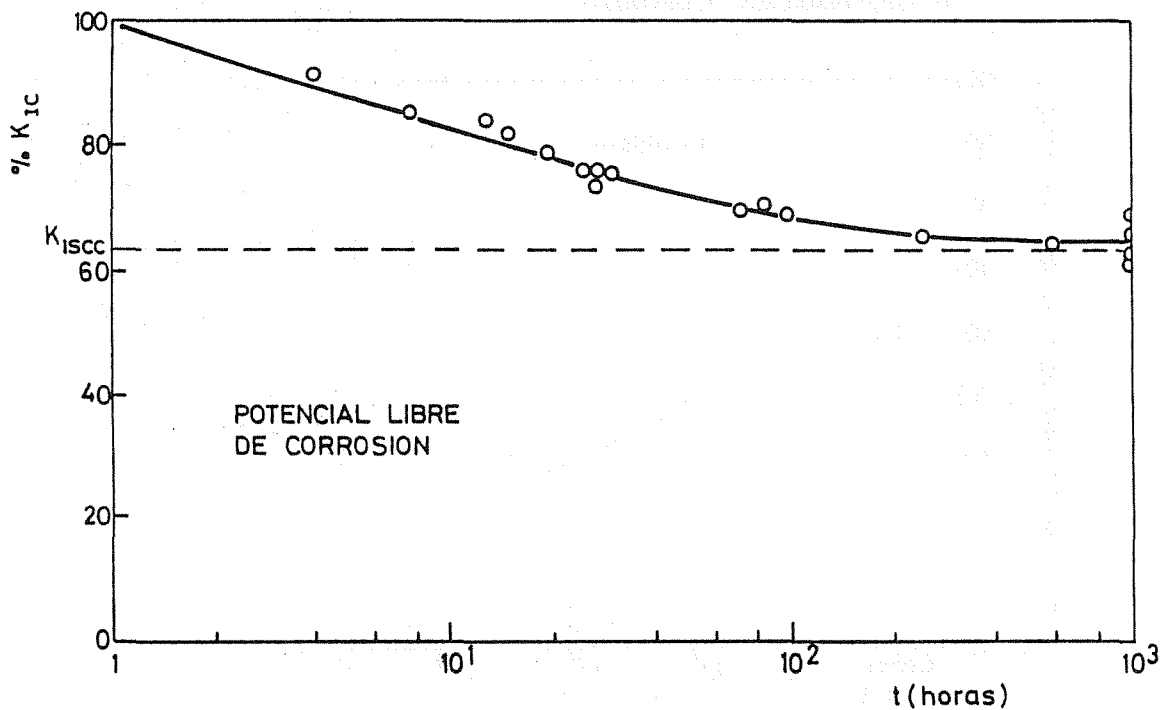


FIGURA 1

ENSAYOS A VELOCIDAD DE DEFORMACION CONSTANTE

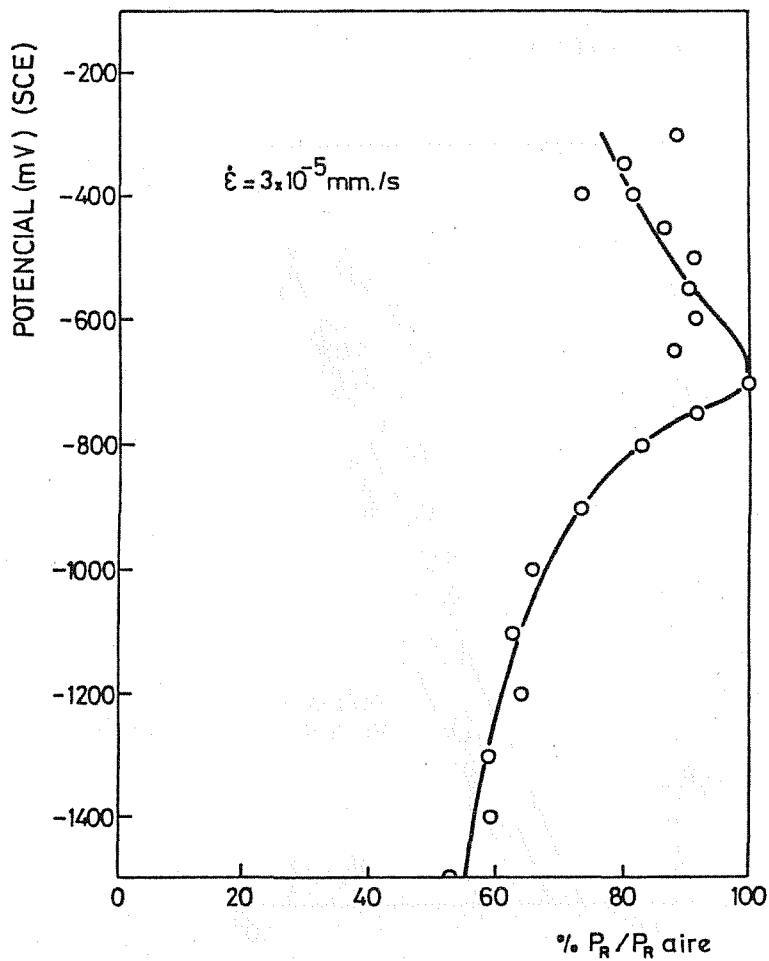


FIGURA 2

ENSAYOS A VELOCIDAD  
DE DEFORMACION CONSTANTE

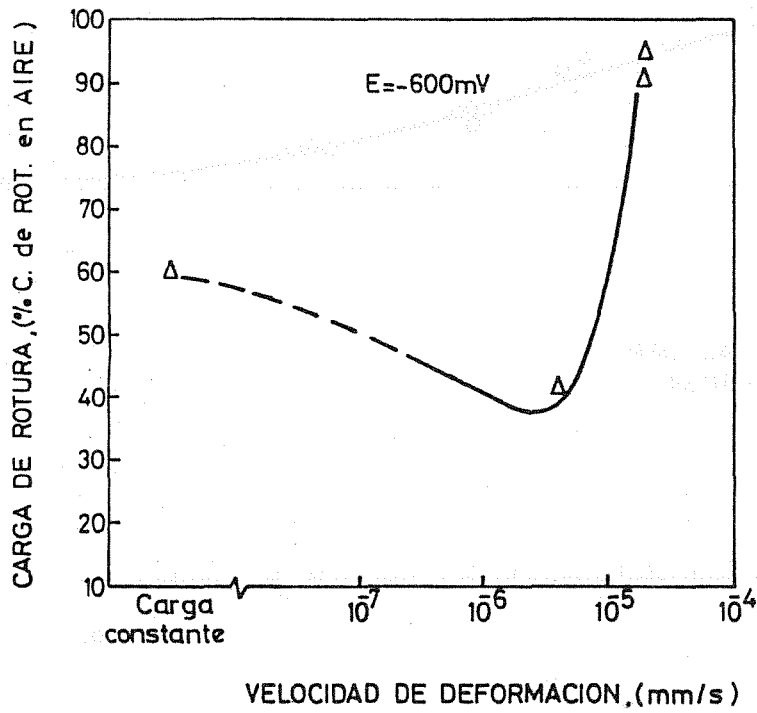


FIGURA 3

ENSAYOS DE CORROSION-FATIGA  
AGUA DE MAR R=0.1  
ONDA TRIANGULAR

- v = 10 Hz
- △ v = 1 Hz
- v = 0.1 Hz

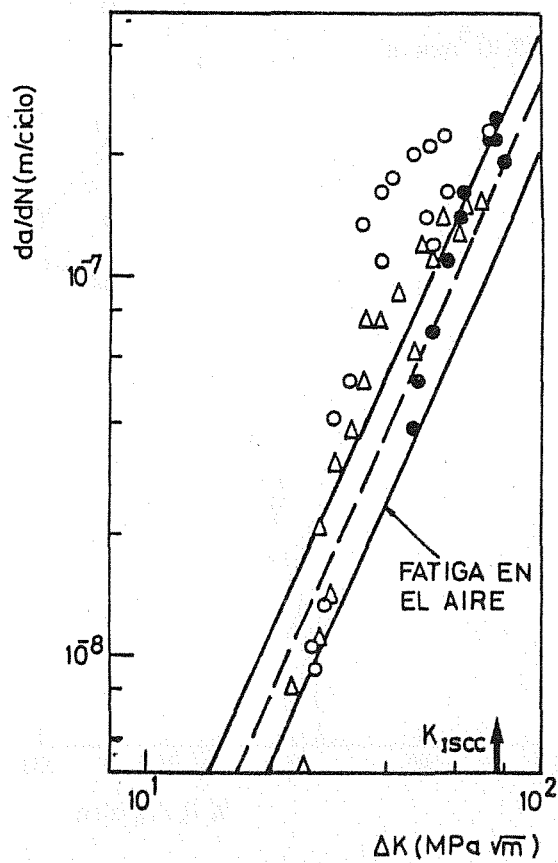


FIGURA 4  
190

ENSAYOS DE CORROSION-FATIGA  
 AGUA DE MAR R=0.1  
 ONDA SINUSOIDAL

- $\nu=10$  Hz
- △  $\nu=1$  Hz
- $\nu=0.1$  Hz

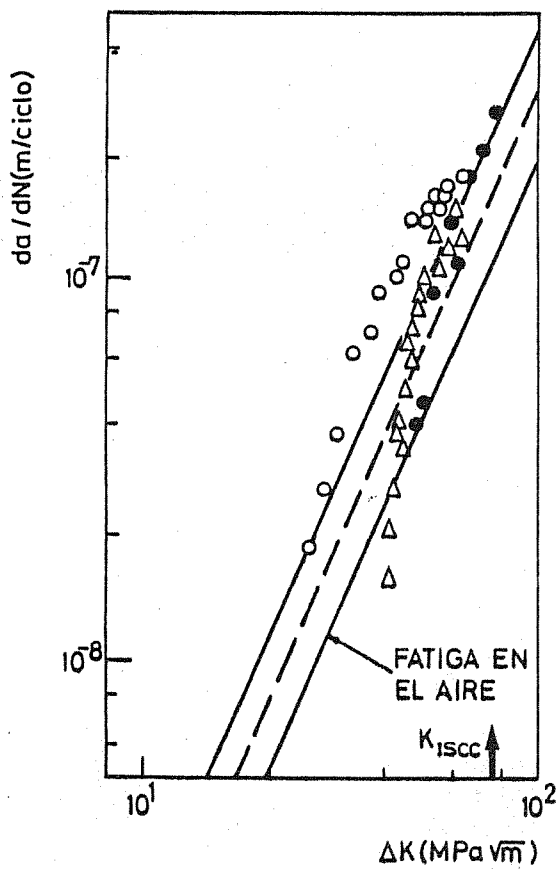


FIGURA 5

ENSAYOS DE CORROSION-FATIGA  
 E LIBRE DE CORROSION  
 AGUA DE MAR  $\nu=0.1$  Hz  
 ONDA SINUSOIDAL

- R=0.1
- R=0.5
- △ R=0.8

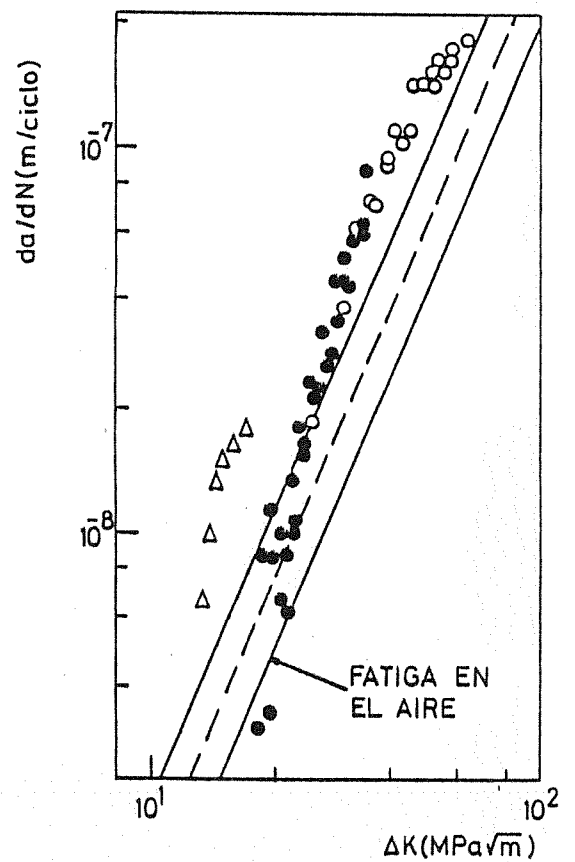


FIGURA 6