

INFLUENCIA DE LA PROTECCION CATODICA SOBRE LA CORROSION  
FATIGA EN ACEROS DE PRETENSADO

ANTONIA MARTIN Y VICENTE SANCHEZ-GALVEZ

Departamento de Física y Física de Materiales  
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos  
UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID  
ESPAÑA

RESUMEN

*Se han realizado ensayos de corrosión fatiga a potencial libre y con acoplamiento de zinc para onda sinusoidal con distintas frecuencias y valores de la relación de tensiones R.*

*Se han aplicado las técnicas de Mecánica de la Fractura para determinar la velocidad de propagación de las fisuras  $da/dN$  en función del intervalo del factor de intensidad de tensiones  $\Delta K$ .*

SUMMARY

*Corrosion fatigue tests have been performed both at the free corrosion potential and coupling with zinc. Sinusoidal stress waves at different frequencies and stress ratio R have been used.*

*Fracture Mechanics concepts have been utilized to determine crack growth rate  $da/dN$  as a function of the stress intensity factor range  $\Delta K$ .*

## 1. INTRODUCCION

Los aceros de muy alta resistencia, que en forma de alambres o barras, constituyen las armaduras activas del hormigón pretensado, se encuentran entre los materiales cuyo comportamiento en varios aspectos de la corrosión ofrecen aún algunas lagunas.

Dentro de los aceros de pretensado, los más utilizados son los eutectoides trefilados, cuyas excelentes propiedades mecánicas han permitido su utilización en grandes construcciones ingenieriles que deben resistir cargas dinámicas, por lo que es importante el conocimiento del comportamiento en fatiga de este material. Ahora bien, en numerosas ocasiones la estructura de hormigón pretensado, además de estar sometida a una oscilación de cargas, está también sometida a un ambiente agresivo. En estas condiciones el conocimiento del comportamiento del acero frente a la corrosión fatiga es fundamental. En este trabajo se aportan recientes datos experimentales sobre medidas de velocidad de propagación de fisuras para muestras prefisuradas en aceros de pretensado en agua de mar artificial (1) con y sin protección catódica, variando la relación de tensiones (R), y las frecuencias.

## 2. MODO EXPERIMENTAL

Para la realización de los ensayos, el material elegido fué un acero al C-Mn, de alta resistencia, de producción comercial y de 7 mm de diámetro. Es un acero eutectoide (contenido en carbono alrededor del 0.8%), trefilado y envejecido. Su composición química y sus propiedades mecánicas se recogen en la Tabla I

TABLA I  
COMPOSICION QUIMICA

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	N (%)
0.820	0.600	0.180	0.010	0.024	0.007

PROPIEDADES MECANICAS

Módulo de elasticidad GPa	Límite elástico $\sigma_{0,2}$ GPa	Tensión de rotura GPa	Alargamiento bajo carga máx. (%)	Tenacidad de fractura $K_{Ic}$ MPa $\sqrt{m}$	Estricción (%)
204,4	1,43	1,67	5,80	119,13	28

Para la aplicación de la Mecánica de la Fractura al estudio de la propagación de fisuras en aceros de alta resistencia se necesitaba una expresión válida del factor de intensidad de tensiones  $K_I$ , para una muestra cilíndrica con una fisura superficial semielíptica. Por medio de un cálculo con elementos finitos [2] se ha obtenido una expresión del factor  $K_I$  promediado sobre el borde de la fisura.

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} (0.473 - 3.286 (a/D) + 14.797 (a/D)^2)^{1/2} ((a/D) - (a/D)^2)^{-1/4}$$

o bien de forma resumida

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} M (a/D)$$

donde:  $a$  = profundidad de la fisura  
 $D$  = diámetro del alambre  
 $\sigma$  = tensión aplicada para puntos alejados de la fisura  
 $M$  = es un factor de corrección no dimensional (3).

El factor de intensidad de tensiones  $K_I$ , así definido, se ha mostrado como un buen parámetro de fractura, ya que la rotura del alambre tiene lugar cuando  $K_I$  alcanza un valor crítico  $K_{Ic}$  que, por consiguiente, puede denominarse con propiedad tenacidad de fractura del acero, y es el dato que figura también en la tabla I. Para la medida de la propagación de las fisuras de estos aceros, se decidió utilizar el método basado en la variación de la rigidez de la muestra al crecer la fisura. Para ello, en primer lugar se determina la curva de rigidez del alambre en función de la profundidad de la fisura.

Con tal fin varias muestras se fatigaron a tracción a una frecuencia de oscilación de 10 Hz y con unas tensiones fijadas y distinto número de ciclos para las distintas muestras de forma que se obtuvieran distintas profundidades de fisura.

Finalizadas estas operaciones, las muestras fueron ensayadas a tracción hasta rotura, midiendo la rigidez de cada una de ellas, esto es, el cociente entre la carga aplicada y la abertura producida en un extensómetro dinámico. Conocidos para todas las muestras ensayadas, los valores de la rigidez y profundidad de fisura real, que se determinó por medición directa una vez rota la muestra por la sección fisurada, los resultados de las distintas muestras se representaron en el gráfico de la figura 1 y se ajustó por mínimos cuadrados una recta rigidez-profundidad de fisura.

En el estudio de la corrosión fatiga, un parámetro fundamental es el  $K_{ISCC}$ , 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. Para obtener este valor umbral se realizaron ensayos a carga constante con muestras fisuradas por fatiga en agua de mar

artificial tanto a potencial libre de corrosión ( $\approx -700$  mV SCE) como al potencial de acoplamiento con zinc ( $\approx -1025$  mV SCE), ver figura 2.

Los potenciales medidos bajo condiciones de circuito abierto se midieron con un electrodo de referencia que fué el de calomelanos saturado. En los ensayos se mide el tiempo para la rotura en función del valor inicial del factor de intensidad de tensiones aplicado. Para determinar el umbral del factor de intensidad de tensiones  $K_{ISCC}$  para la no propagación de la fisura a carga constante, cuando una muestra alcanzaba las 1000 horas sin romper, se desmontaba el ensayo y se consideraba que el factor de intensidad de tensiones aplicado estaba por debajo del umbral. En todos los casos se midió la profundidad de fisura real inicial de las muestras una vez rotas.

En cuanto a los ensayos a carga oscilante con muestras prefisuradas, se ha estudiado la propagación de la fisura sometida simultáneamente a fatiga y a la acción de agua de mar artificial, utilizando los mismos potenciales de polarización que en los ensayos a carga constante. El estudio de propagación de fisuras por corrosión fatiga en alambres prefisurados, utilizando el método de la variación de la rigidez no permitía utilizar células de corrosión para contener el líquido agresivo, ya que su tamaño era compatible con la base de medida del extensómetro, necesariamente pequeño si se deseaba la resolución suficiente y tampoco se podía introducir el extensómetro en la célula porque podría dañarse. La solución adoptada consistió en hacer circular el líquido agresivo en circuito cerrado por medio de una bomba peristáltica. En una zona del circuito se dispuso un tubo de goma flexible atravesado por la muestra de modo que la fisura quedaba en el interior del tubo, expuesta continuamente a la acción del líquido, sin afectar a la estructura del conjunto [4]. El diámetro del tubo permite la colocación del extensómetro dinámico sobre la muestra fijado con suficiente proximidad a los labios de la fisura pero sin contacto con la disolución, como se ve en la figura 3.

Con el extensómetro permanentemente sobre la muestra durante el proceso de carga cíclica y la zona fisurada en contacto con la disolución, se tiene en cada ciclo la oscilación de carga y la correspondiente variación de abertura del extensómetro, de donde inmediatamente se determina la rigidez de la muestra y con la curva rigidez-profundidad de la fisura (figura 1), el valor de la profundidad de la fisura. En los ensayos a carga oscilante con acoplamiento de zinc el sistema es similar. El tubo de goma es atravesado por la muestra y en otra zona próxima a ella atravesado por una barrita de zinc que se conectó al acero por una unión metálica. Tanto la muestra como el zinc quedaron expuestos a la acción del líquido sin afectar al resto de la estructura. El esquema puede verse en la figura 4.

### 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los ensayos a carga constante se

ofrecen en las figuras 5 y 6.

Se puede observar la relación entre el factor de intensidad de tensiones expresado como porcentaje del valor de la tenacidad de fractura del material y el tiempo de rotura. En ambos casos existe un valor umbral  $K_{ISCC}$ , por debajo del cual la fisura no se propaga.

Los ensayos a carga oscilante se han realizado en dos medios distintos, aire y agua de mar artificial, haciendo oscilar la tensión de tracción aplicada a la muestra según una onda con forma, frecuencia y amplitud previamente elegidas.

Se ha cubierto la gama de frecuencias comprendida entre 0.1 y 10 Hz y se han empleado ondas sinusoidales. En cuanto a los intervalos de carga utilizados, se ha mantenido en todos los ensayos una relación de tensiones (R) constante de 0.1, 0.5 y 0.8 (relación entre valores mínimo y máximo de la tensión en el ciclo). De los ensayos se ha obtenido la velocidad de crecimiento de la fisura  $da/dN$ , frente al incremento del factor de intensidad de tensiones  $\Delta K_I$ .

Las curvas  $da/dN$  frente a  $\Delta K_I$  para potencial libre de corrosión están representadas en la figura 7.

Las curvas  $da/dN$  frente a  $\Delta K_I$  para potencial de acoplamiento con zinc están representadas en la figura 8.

#### 4. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Parece evidente a la vista de los resultados que la aplicación de una carga oscilante en agua de mar tiene un efecto pernicioso sobre el comportamiento del acero con relación al comportamiento de fatiga en el aire. En todos los ensayos a carga oscilante se ha dibujado una línea continua que muestra el valor medio de todos los resultados experimentales de velocidad de crecimiento de fisuras frente al factor de intensidad de tensiones para ensayos de fatiga en el aire y diferentes frecuencias, amplitudes de tensión y relación de tensiones. El comportamiento en fatiga sigue la ley de Paris.

$$da/dN = C (\Delta K_I)^n \quad (5)$$

donde las constantes C y n toman los valores

$$C = 7,94 \cdot 10^{-12} \text{ m/c y } n = 2,3$$

Las figuras muestran dos líneas de trazos paralelas a esta línea que engloban el 95% de todos los resultados experimentales obtenidos por fatiga en el aire.

Los resultados obtenidos en la figura 7, correspondientes a

potencial libre de corrosión muestran en general que la velocidad de propagación de las fisuras depende fuertemente de la frecuencia de la oscilación, en el sentido de que frecuencias lentas ocasionan una mayor velocidad de propagación de la fisura por ciclo que las frecuencias rápidas, resultado que puede explicarse fácilmente ya que el tiempo que tarda en abrirse y cerrarse la fisura es mayor por lo que el medio agresivo está durante más tiempo en contacto con el fondo de la fisura siendo mayores los efectos de la corrosión. También se comprueba la influencia del valor de la relación de tensiones  $R$  en la velocidad de propagación. En general la velocidad aumenta al crecer  $R$ , como puede verse en todas las gráficas.

A continuación vamos a discutir los resultados obtenidos en corrosión fatiga cuando las muestras prefisuradas están sometidas a un potencial de acoplamiento con zinc. Como se ve en la figura 8 la velocidad de propagación de la fisura depende también de la frecuencia de oscilación, que causa un efecto mayor a medida que la relación de tensiones es mayor. Si la relación de tensiones es de 0.1 y 0.5 las mayores velocidades de propagación se consiguen con frecuencias de 0.1 Hz, mientras que para 1 y 10 Hz, las velocidades son menores pero aún así son del orden del doble de las obtenidas en el aire. Si la relación de tensiones es de 0,8, la velocidad de propagación sufre un notable aumento para las tres frecuencias estudiadas. También tiene una gran influencia en la velocidad de propagación el valor de  $R$ , principalmente para los valores bajos de  $\Delta K$  [6].

En las figuras 7 y 8, para una relación de tensiones de 0.1, se han situado en el eje de abscisas los valores umbrales del factor de intensidad de tensiones  $K_{ISCC}$  obtenidos en los ensayos a carga constante a potencial libre de corrosión y con acoplamiento de zinc respectivamente. Esto ha permitido comprobar que los ensayos de corrosión fatiga se han realizado para valores de  $K_I$  máximo por debajo de  $K_{ISCC}$ , por lo que puede afirmarse que incluso por debajo del valor umbral de corrosión bajo tensión, hay un aumento en la velocidad de propagación de las fisuras en el medio con respecto a la velocidad del aire, es decir, se confirma la existencia de corrosión fatiga verdadera [7]. En estas mismas figuras también se observa una reducción en la velocidad de crecimiento de la fisura, incluso inferiores a las velocidades del aire, para valores de  $\Delta K_I$  bajos. La causa de ello es la formación de productos de corrosión, cuando se trata del acero a potencial libre de corrosión o de depósitos calcáreos, cuando está sometido a un potencial de acoplamiento con zinc, que se originan en el interior de la fisura y que provocan el efecto cuña responsable de la correspondiente reducción del intervalo del factor de intensidad de tensiones en el fondo de la fisura, dando lugar a un  $\Delta K$  efectivo que produce el cierre y disminución de la velocidad de crecimiento. La disminución en la velocidad de crecimiento aparece tanto para la frecuencia de 0.1 Hz como para frecuencias de 1 Hz y 10 Hz, debido a que en soluciones con oxígeno disuelto las frecuencias altas causan mayor renovación de la solución y del oxígeno en la fisura por medio del bombeo de la disolución y dan lugar también a la formación de productos de

corrosión que se introducen en la fisura [8]. Este efecto de cierre de la fisura sólo debería de aparecer cuando la relación de tensiones es pequeña, ya que cuando esta relación es de 0.5 y 0.8, la tensión mínima es más alta y no debe producirse el cierre de la fisura, sin embargo en la figura 7 para  $R = 0.5$  también aparecen velocidades de crecimiento de las fisuras inferiores a los valores del aire. Este hecho fué debido a la introducción de una sobrecarga en la fisuración previa que provocó un retardo en las velocidades iniciales de propagación.

## 5. CONCLUSIONES

El efecto perjudicial del medio agresivo se pone de manifiesto en los resultados, donde puede apreciarse como a igualdad de sollicitación, esto es, para un mismo intervalo de oscilación del factor de intensidad de tensiones, la velocidad de crecimiento de las fisuras es mayor en el medio que en el aire. La velocidad de crecimiento de las fisuras es mayor cuanto menor es la frecuencia y mayor la relación de tensiones  $R$ . Para valores de  $\Delta K_I$  bajos se observa un retraso en dicha velocidad de propagación que llega a ser inferior incluso a la velocidad media en el aire, fenómeno éste que se atribuye al cierre de la grieta "crack closure". Se ha demostrado la existencia de corrosión fatiga verdadera ( $K_{max} < K_{ISCC}$ ) en aceros de pretensar en agua de mar artificial tanto para potencial libre de corrosión como para potencial de acoplamiento con zinc. El efecto de la polarización catódica por acoplamiento con zinc resulta un aumento de la velocidad de crecimiento de las fisuras por corrosión fatiga respecto de la velocidad para potencial libre de corrosión.

## REFERENCIAS

- [1] ASTM D 1141 (1971) "Standard Specification for Substitute Ocean Water"
- [2] Valiente, A. (1980) "Criterios de Fractura para Alambres". Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- [3] Elices, M. (1984) "Fracture of Steels for Reinforcing and Prestressing Concrete" Cap. 5 de Fracture Mechanics of Concrete, G.C. Sih y A. Di Tommaso, Ed. Martinus Nijhoff Publ. La Haya.
- [4] Sánchez-Gálvez, V., Valiente, A. y Elices, M. (1983). Rev. Iberoamericana de Corrosion y Proteccion, 117.
- [5] Paris, P.C. y Erdogan, F. (1963). J. Basic Engng. ASME Serie D p. 528.
- [6] Musuva, J.K. y Radom, J.C. (1979). Fatigue of Engineering Materials and Structures, 1, 457.
- [7] McEvily, A.J. y Wei, R.P. (1972) "Fracture Mechanics and Corrosion Fatigue" Corrosion Fatigue NACE, 2, 381.
- [8] Van der Velden, R., Ewalds, H.L., Schultze, W.A. y Punter, A., (1983), ASTM, STP 801, p. 64.

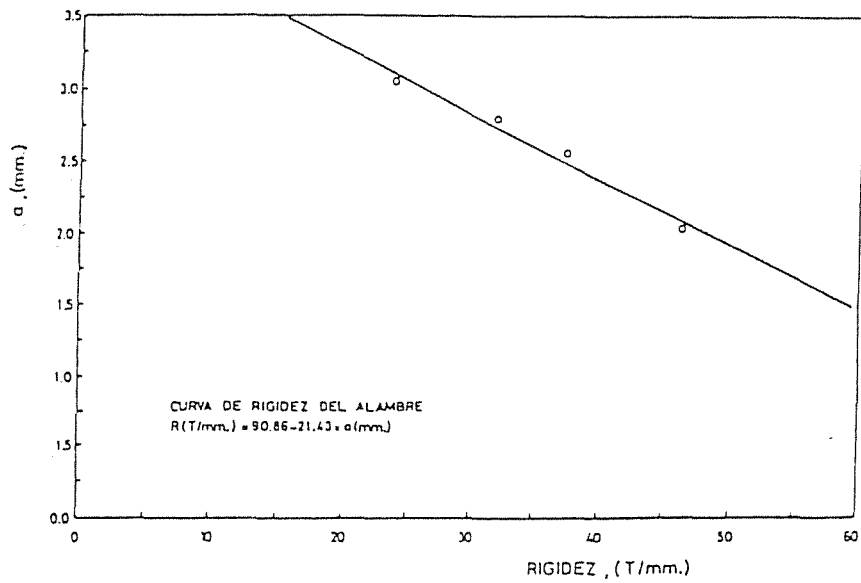


Fig. 1 - Rigidez de un alambre fisurado en función de la profundidad de fisura.

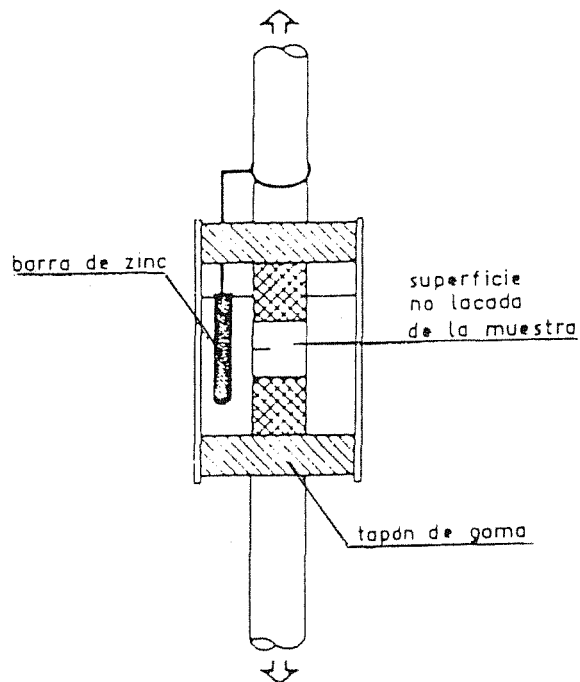


Fig. 2 - Esquema del montaje de las muestras con acoplamiento de zinc en los ensayos de corrosión bajo tensión.



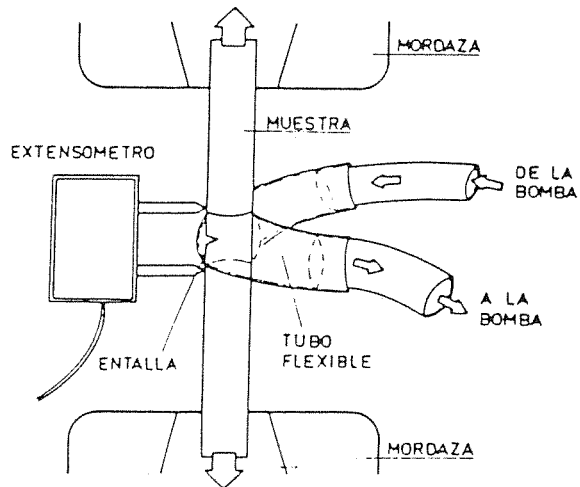


Fig. 3 - Detalle del dispositivo para ensayos de corrosión fatiga.

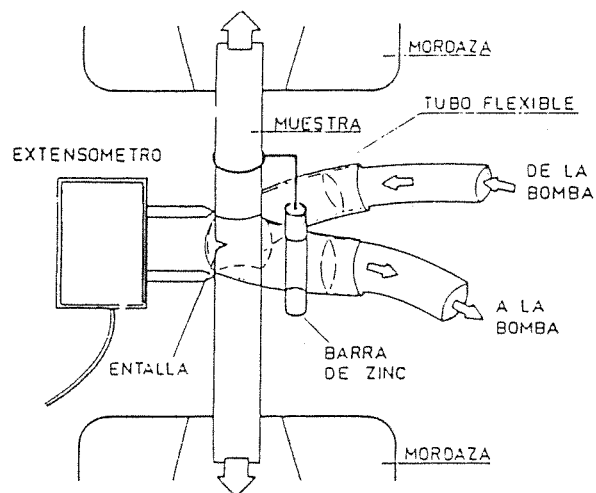


Fig. 4 - Detalle del dispositivo para ensayos de corrosión fatiga con acoplamiento de zinc.

ENSAYOS A CARGA CONSTANTE - DISOLUCION: AGUA DE MAR

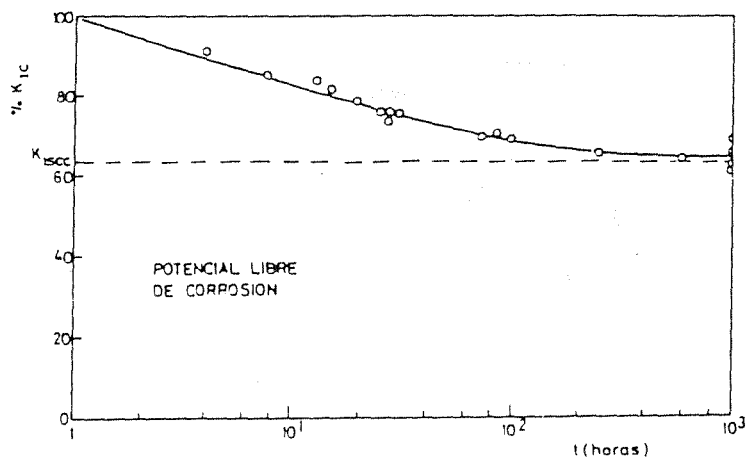


Figura 5

ENSAYOS A CARGA CONSTANTE - DISOLUCION: AGUA DE MAR

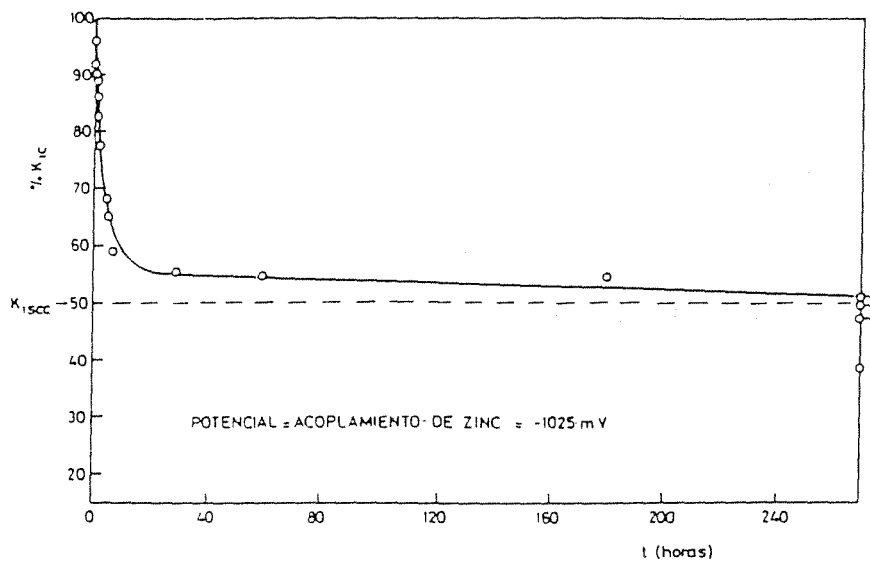


Figura 6

ENSAYOS DE CORROSION-FATIGA  
 AGUA DE MAR  
 ONDA SINUSOIDAL  
 ● v=10 Hz  
 △ v=1 Hz  
 ○ v=0.1 Hz

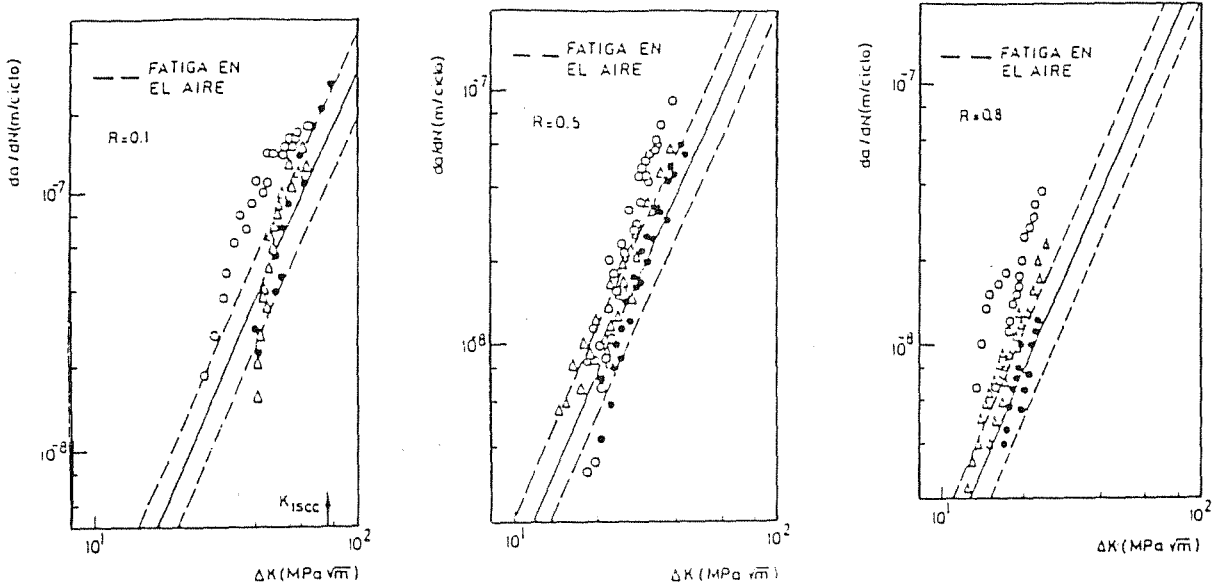


Figura 7

ENSAYOS DE CORROSION-FATIGA  
 AGUA DE MAR  
 E DE ACOPLAMIENTO CON Zn (= 1025 mV)  
 ONDA SINUSOIDAL  
 ● v=10 Hz  
 △ v=1 Hz  
 ○ v=0.1 Hz

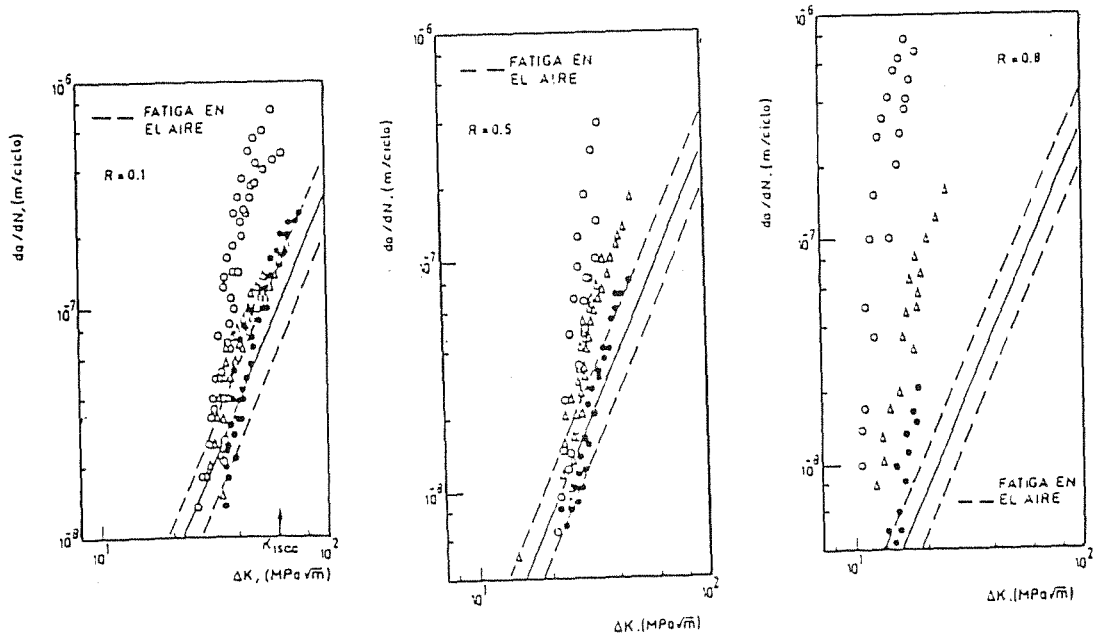


Figura 8