ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LOS DEFECTOS EN EL ALAMBRE DE PRETENSADO Y SU RELACION CON EL ENSAYO FIP

M.A. Olivares[1], A. Valiente[2] y J.C. Gálvez[1]

[1]E.T.S. Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad de Castilla la Mancha, Av. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real.

[2]Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, C. Universitaria, 28040 Madrid.

Resumen. El ensayo FIP (Federación Internacional de Pretensado) de corrosión bajo tensión (UNE 36-464-86) presenta una gran dispersión experimental. En la medida en que el ensayo es un ensayo de fragilización por hidrógeno, el estado superficial del alambre puede influir en los resultados. Bajo el nombre genérico de estado superficial se contempla tanto la presencia de defectos superficiales como la existencia de tensiones residuales cercanas a la superficie. Este trabajo se centra en la influencia de los defectos superficiales del alambre. Con este fin se propone un método estadístico para caracterizar el estado superficial del alambre de pretensado. El método propuesto se basa en la estadística de valores extremos y permite estimar el tamaño máximo del defecto en una determinada longitud de alambre. El método ha sido aplicado a probetas de alambre ensayadas mediante el método FIP de corrosión bajo tensión, con el objeto de comparar la variación de la distribución estadística de los tamaños máximos de las zonas expuestas al medio agresivo antes y después del ensayo. El análisis de los resultados apunta a que el proceso de fisuración por hidrógeno se localiza en el defecto en el que se inicia la rotura.

Abstract. The FIP Test Method (UNE 36-464-86) for stress corrosion leads to a broad experimental scatter. Since this is a hydrogen embrittlement testing procedure, the presence of surface defects and the residual stresses may affect to the results. This paper deals with the influence of the surface defects on the wire in FIP test method results. A statistical tool is presented to characterize the surface condition of the prestressing wire. The method is based on the extreme value statistical theory and helps to estimate the maximum size of a defect in a selected length of a wire. The method is applied to tested wires under the FIP testing procedure, and a comparison of the defects is done before and after testing. Based on the experimental results it seems that the cracking process associated with the presence of the hydrogen is only focussed in the defect that induced the crack.

1. INTRODUCCIÓN

El acero eutectoide trefilado es un material muy empleado en la industria. Su elevada resistencia mecánica, unida a una buena ductilidad y tenacidad, hacen de él un material muy atractivo. En ingeniería civil se emplea como armadura activa, en forma de alambres y cordones, en el hormigón pretensado.

Este acero es sensible a la corrosión bajo tensión, por lo que la normativa española [1] y la europea [2] establecen recomendaciones encaminadas a garantizar su durabilidad. La EHE [1] establece una condición suficiente de baja sensibilidad frente a la corrosión bajo tensión a partir del ensayo UNE 36-464-86 [3], o ensayo FIP, en el cual el mecanismo de fragilización por hidrógeno es predominante. La norma de hormigón pretensado ISO 15630-3 [4] incluye el mismo ensayo y añade el ensayo propuesto por DIBt (Instituto Alemán de Construcción) como alternativa.

La validez del ensayo FIP para medir la susceptibilidad de las armaduras activas a la corrosión bajo tensión ha sido muy discutida por la gran dispersión intrínseca que ofrecen sus resultados y porque no establece una barrera bien definida de comportamiento satisfactorio frente a la corrosión bajo tensión. El estado superficial del alambre parece que puede afectar al comportamiento del alambre frente a este tipo de ensayos [5-6]. Bajo la denominación de estado superficial se contemplan dos aspectos distintos: presencia de defectos en la superficie del alambre y tensiones residuales de tracción en la piel del alambre. Ambos aspectos están directamente relacionados con el procedimiento de producción de estos alambres.

El proceso de producción de estos alambres es el de trefilado continuo del material de partida denominado alambrón. El alambrón se hace pasar por una serie de hileras consecutivas que van reduciendo el diámetro por deformación en frío hasta alcanzar las dimensiones y las propiedades adecuadas.

Durante el proceso de trefilado es habitual la formación de ciertas irregularidades superficiales o defectos. Estos defectos provocados por el proceso se añaden a los ya existentes en el material que tienen su origen en la fabricación de la materia prima o alambrón. Además se generan tensiones residuales que se reducen considerablemente mediante un proceso termo-mecánico denominado estabilizado del alambre.

Este trabajo se centra en el estudio de los defectos superficiales del alambre y su relación con los resultados del ensayo FIP. Trabajos previos [7-8] apuntan a que el tamaño máximo de defecto podría ser el factor determinante en procesos de daño progresivo. Por ello se emplea la estadística de valores extremos para estimar la profundidad máxima de un defecto en una cierta longitud de alambre. El método se aplica a probetas de alambre ensayadas por el método FIP de evaluación de la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión, con el objeto de determinar cómo varían las dimensiones de los defectos del alambre expuestas la disolución corrosiva antes y después del ensayo.

2. EXPERIMENTACIÓN REALIZADA

2.1. Material

El material estudiado en este trabajo está constituido por alambres de 5.2 mm de diámetro de un acero perlítico, que constituye el alma de un cable de 7 alambres y 15. 2 mm de diámetro nominal. El material de partida, alambrón, está fabricado a partir de mineral de hierro, y no con materia prima reciclada. La Tabla 1 presenta la composición química del acero.

La caracterización mecánica del alambre se realizó mediante ensayos de tracción realizados con una máquina electromecánica de 100 kN de capacidad y la medida de deformaciones con extensómetros resistivos de 25 mm de base y 1 μm de resolución. La Tabla 2 resume las propiedades mecánicas del alambre. Como referencia se ha incluido en la tabla las especificaciones de la norma UNE 36094 para un alambre de 5 mm Y1860C.

Tabla 1. Composición química del material en peso

% C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%V	%Fe
0,81	0,64	0,23	0,01	0,01	0,22	0,04	resto

La microestructura de estos aceros es la típica de un acero eutectoide formada por colonias perlíticas en las que se alternan las bandas de ferrita y cementita. La Figura 1 muestra una micrografía de la sección longitudinal del alambre, en ella se aprecia claramente la orientación que adquiere la microestructura debido al proceso de deformación en frío orientando las láminas de cementita y estirando las colonias perlíticas en la dirección del trefilado.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero.

Propiedad	E (GPa)	$R_{p\ 0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	e_m %
Alambre trefilado	208	1615	1851	5.8
Acero Y1860C	205±7%	>1580	>1860	>3.5

Esta orientación contrasta con la mostrada en la Figura 2 que corresponde a la sección transversal del alambre y en la que no se aprecia ninguna orientación preferente de las colonias de perlita.

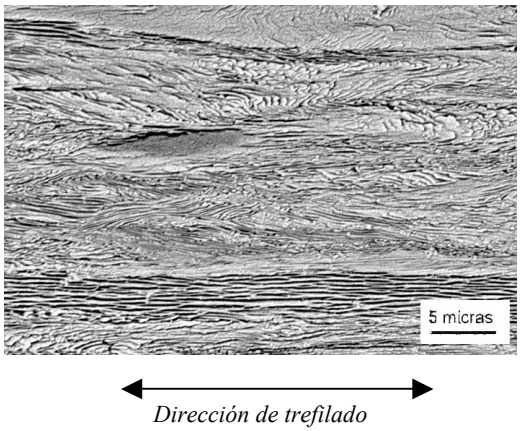


Fig.1. Microestructura del alambre (sección longitudinal).

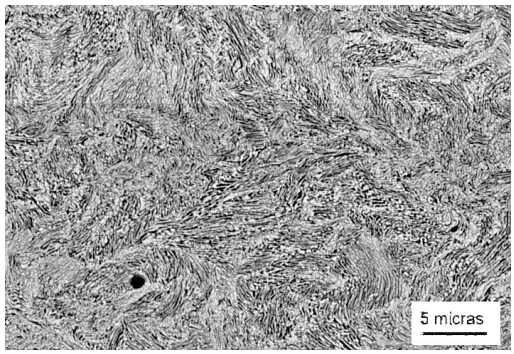


Fig 2. Microestructura del alambre (sección transversal)

2.2. Ensayos de susceptibilidad a la corrosión bajo tensión

Los alambres objeto de este estudio fueron sometidos a ensayos de susceptibilidad a la corrosión bajo tensión mediante el método propuesto por la FIP, tal y como se especifica en la norma ISO/DIS 15630-3 [4]. El método consiste en sumergir una probeta del producto en una solución de tiocianato amónico (20%) y agua (80%) a 50º C y someterla a una carga de tracción constante e igual al 80% de la resistencia mecánica R_m durante todo el ensayo, registrando el tiempo

que tarda en producirse la rotura (tiempo de vida). La Figura 3 muestra una foto del dispositivo de ensayo.

Se realizaron 5 ensayos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3. Destaca la dispersión de resultados. Esta dispersión es típica de este tipo de ensayos y puede atribuirse a la sensibilidad de este ensayo al estado superficial de la probeta, caracterizado por los defectos superficiales [5] y las tensiones residuales en la superficie, debido en gran medida a la dependencia del tiempo de iniciación o incubación del estado superficial del alambre [9].

El alambre cumple las especificaciones de la norma UNE 36464 [3]: tiempo de vida medio superior a 4 horas y el menor de los tiempos superior a 1,5 horas.

Tabla 3. Resultados obtenidos en el ensayo FIP de fragilización por hidrógeno.

Probeta	Tiempo de rotura (horas)
E-CBT-1	6,90
E-CBT-2	4,00
E-CBT-3	4,11
E-CBT-4	2,52
E-CBT-5	3,88

2.3. Observación y medida de defectos superficiales

Las medidas de defectos superficiales se llevaron a cabo sobre muestras de alambre en estado de recepción y en el estado producido por la inmersión en la solución FIP durante el tiempo de ensayo. Estas últimas procedían de la parte del alambre que habían estado en contacto con la solución corrosiva, para lo cual se separaron del resto una vez concluido el ensayo FIP.

La capa de fosfato que recubre la superficie del alambre fue eliminada con objeto de poder observar y medir los defectos de su superficie. El abrasivo empleado para eliminar la capa protectora fue un estropajo de material polimérico comercial.

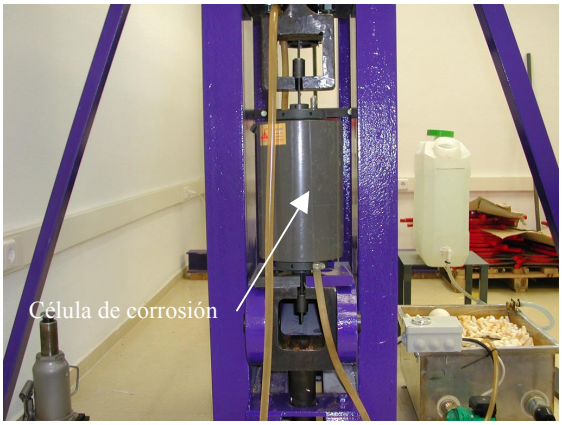


Fig.3. Alambre durante el ensayo FIP en el dispositivo de ensayo.

En una primera observación de la superficie del alambre se detectaron dos morfologías de defectos. En la Figura 4 se aprecia la primera de las, que comprende a aquellos defectos en los que la dimensión longitudinal prevalece sobre la circunferencial ya que son muy alargados en la dirección del trefilado. La densidad de este tipo de defectos es muy elevada y dan lugar a una apariencia de rugosidad de la superficie del alambre. El hecho de que también en las primeras etapas del proceso de trefilado aparezcan defectos similares hace pensar que provienen del alambrón l de partida y que se han deformado durante el proceso del trefilado.

La segunda morfología encontrada aparece en la imagen de la Figura 5. Este tipo de defectos aparece con poca frecuencia y casi siempre dentro de una formación de varios defectos de formas más o menos redondeadas y alineados en dirección del trefilado sobre una misma generatriz. Su forma no es tan alargada como la morfología anterior y son normalmente más anchos y de menor longitud. Es probable que su formación se produzca durante el trefilado del alambre debido a imperfecciones en el interior de la hilera.



Fig.4. Defectos superficiales del alambre



Fig.5. Colonia de defectos alineados sobre una generatriz del alambre.

Una vez detectados y localizados los defectos superficiales se procedió a medir su profundidad. Para ello se dividió el alambre en intervalos de 1 cm de longitud. En cada uno de esos intervalos se registró el valor máximo de la profundidad del defecto.

La medida de las profundidades de los defectos se realizó con un microscopio de foco graduado, midiendo la diferencia de alturas de foco necesarias para la parte más alta y más baja del defecto. La resolución de la medida fue de 1 μm.

De acuerdo con la referencia [10], la profundidad de defecto en alambres trefilados se ajusta bien a una distribución de valores extremos del tipo Gumbel. Esta distribución determina la probabilidad Pr(X<x) de que la medida X de un máximo local de profundidad sea menor o igual a un valor x según la siguiente expresión:

$$\Pr(X<x)=F(x)=\exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right] \quad (1)$$

donde λ y δ son los dos parámetros de la distribución, respectivamente denominados de localización y de escala.

Los valores de los parámetros λ y δ han de obtenerse de series de valores medidos de la variable X. La referencia [10] contiene una exhaustiva comparación de distintos procedimientos de estimación de parámetros aplicados a la distribución de Gumbel. El trabajo se basa en la generación numérica aleatoria de un millar de series de igual número de datos, todos ellos procedentes de una misma distribución de Gumbel con λ unidad.

El millar de series se generó para cada una de las parejas de valores del cociente δ/λ de la distribución de Gumbel y del número N de datos de la serie, resultantes de combinar tres del primero (δ/λ = 0,1; 0,5; 0,9) y ocho del segundo (N = 30; 50; 80; 100; 150; 200; 300; 400). Con los N datos de cada serie se estimaron los parámetros λ y δ de la distribución de Gumbel por los métodos de máxima verosimilitud, de identificación de momentos y de ajuste por mínimos cuadrados a la curva de probabilidad de Gumbel.

La estadística de parámetros estimados que proporciona el millar de estimaciones de λ y δ realizadas por cada una de las 24 parejas de valores de N y δ/λ pone de manifiesto en los 24 casos que: a) el procedimiento de estimación más fiable de los tres estudiados es el de máxima verosimilitud, ya que la desviación típica de los mil valores estimados es la menor de las tres, y la media es la más próxima al parámetro empleado para generar los datos; b) la calidad de la estimación es alta y tiende a estabilizarse con el número N de datos empleados en el cálculo del valor estimado, obteniéndose niveles de calidad cercanos al óptimo con valores de N superiores a 50.

En virtud de estos resultados, se muestrearon un total de 60 intervalos de 1 cm de longitud para cada uno de las dos estados del alambre estudiados (antes del ensayo y después del ensayo en la solución de tiocianato amónico), determinándose los valores correspondientes de λ y δ mediante el método de máxima verosimilitud. Para ello es necesario resolver el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} 0&=\sum_N\left[\frac{\bar{x}}{\delta}-1-\frac{x_i}{\delta}\right]\exp\left(-\frac{x_i}{\delta}\right) \\ \lambda&=\delta\left[\ln N-\ln\sum_N\exp\left(-\frac{x_i}{\delta}\right)\right] \end{aligned} \quad (2)$$

donde x_i son los valores medidos y $\bar{x}$ su valor medio. Los valores de λ y δ obtenidos, así como la media $\overline{X}$ y la desviación típica $\overline{X}'$ de la distribución de Gumbel correspondientes a estos valores, se recogen en la Tabla 4:

Tabla 4. Valores estimados de δ y λ.

Estado	Inicial	Postcorrosión
λ(μm)	17,8	18,6
δ(μm)	2,6	3,1
$\overline{X}$ (μm)	19,3	20,4
$\overline{X}'$ (μm)	3,3	4,0

La calidad de la estimación puede verse en la Figura 6, donde se ha representado la probabilidad de que la profundidad máxima de defecto en un centímetro de alambre sea inferior a un valor dado, tanto para el alambre en estado de fabricación como en el estado posterior al ensayo FIP. En esa figura se comparan las predicciones resultantes de particularizar la función de distribución de Gumbel para los parámetros de la Tabla 4 con los datos medidos en el alambre, asignando al dato x_i, i-ésimo de la serie de 60 ordenada de menos a mayor, la probabilidad [11]:

$$\Pr[X<x_i]=\frac{i-0,3}{N+0,4}=\frac{i-0,3}{60+0,4} \quad (3)$$

La Figura 6 confirma la validez de la distribución de Gumbel para describir estadísticamente los máximos locales de profundidad de defecto en el acero estudiado, en estado de fabricación y tras ser sometido al ensayo FIP.

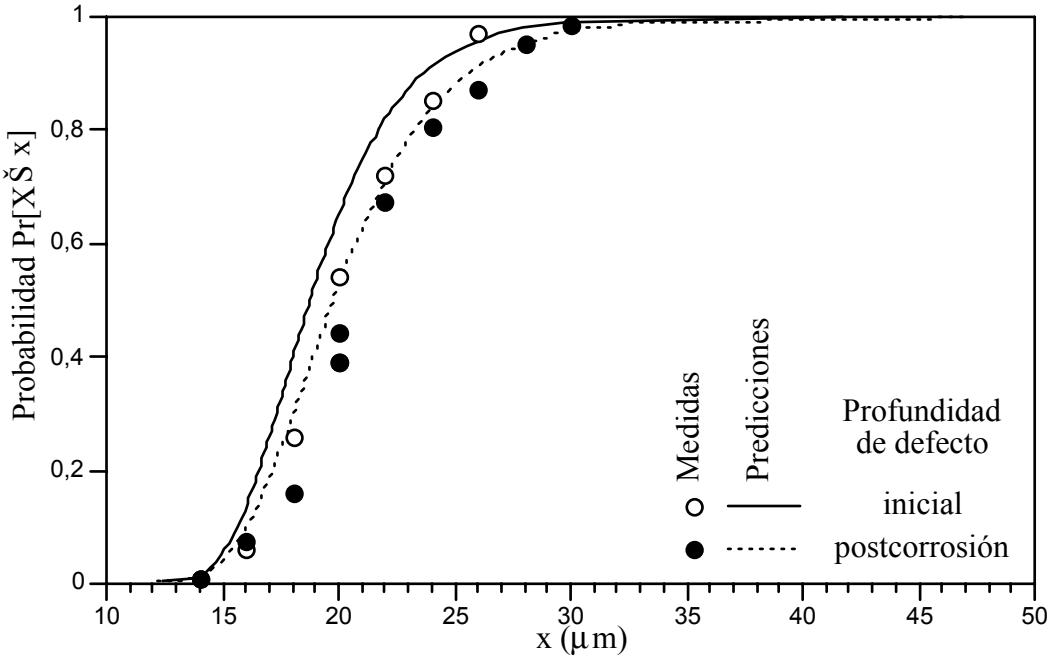


Fig.6. Profundidades máximas de defecto medidas en el alambre y descripción estadística de las mismas mediante la distribución de Gumbel.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos (Tabla 4) se deduce que el parámetro λ ha experimentado un incremento aproximado del 4 % al comparar el estado inicial del alambre con el estado postcorrosión, mientras que el parámetro δ lo ha hecho en un 20 %. Los datos aportados en la referencia [10] indican que ambos incrementos son del mismo orden que las desviaciones típicas asociadas a la estimación de los dos parámetros para el tamaño de muestra considerado (n=60). Por tanto, no se puede afirmar que haya existido variación del tamaño de defectos en las poblaciones analizadas, o bien, que si la ha habido, ha sido tan pequeña que la enmascara la incertidumbre asociada al proceso de estimación mediante un tamaño de muestra de 60 defectos.

Las mínimas diferencias estadísticas de los defectos del alambre antes y después de ser sometido al ensayo FIP apuntan a que el proceso de corrosión bajo tensión en este medio es un proceso de daño por fisuración muy localizado en las inmediaciones del defecto que provoca la rotura.

Para corroborar lo anterior se seccionaron transversalmente varias probetas ensayadas mediante el método FIP, a distintas distancias de la zona de rotura. En ninguna de estas secciones transversales alejadas de la rotura se encontraron fisuras, siendo las profundidades de defecto observados en estas secciones muy similares a las medidas desde el exterior. Por el contrario, en las zonas muy próximas a la rotura aparecieron fisuras con profundidades de varios centenares de micra. La Figura 7 muestra una de estas fisuras.

Este dato experimental confirma que el fenómeno de fisuración en la disolución de tiocianato amónico es un proceso de fisuración que se produce en una zona muy localizada del alambre, y corrobora los resultados obtenidos mediante análisis estadístico, según los cuales la corrosión bajo tensión apenas altera los defectos del alambre lejos de la rotura.

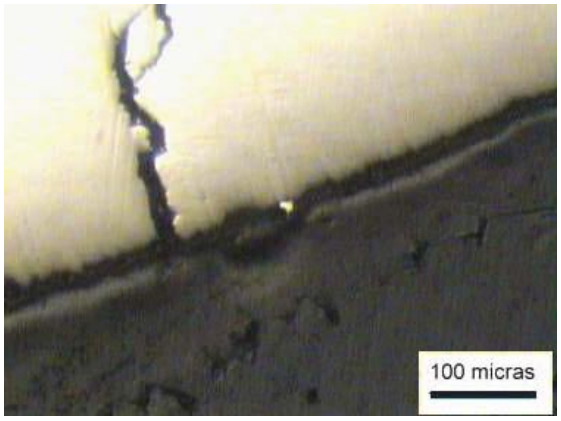


Fig.7. Micrografía de una sección transversal del alambre en la zona próxima al punto de rotura.

La explicación que esto sugiere es que la etapa esencial del proceso es la nucleación de fisuras a partir de defectos previos. Una vez nucleadas las primeras en la zona donde los defectos representan un mayor daño inicial, su propagación sería muy rápida y provocaría la rotura del alambre sin dar tiempo a la nucleación de fisuras secundarias en defectos alejados de la zona de rotura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comunidad Económica Europea y al Ministerio de Ciencia y Tecnología las ayudas económicas concedidas a través de los proyectos EVK4-2001-00091 y MAT2001-3863-CO3-02. Así mismo agradecen a la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha la ayuda concedida a través del proyecto PBI-02-006. Además agradecen a Calidad Siderúrgica la financiación parcial de los ensayos.

REFERENCIAS

[1] Comisión Permanente del Hormigón, "Instrucción de Hormigón Estructural EHE: art. 37.4.1, (1998).

[2] Comité Europeo de Normalización, "EN-1992 Proyecto de Estructuras de Hormigón (Eurocódigo 2): art 3.3.5.3", (1992).

[3] Norma Española UNE 36-464-86, "Armaduras de hormigón pretensado: Ensayo de fragilización por hidrógeno; Método del tiocianato amónico", (1986).

[4] Norma ISO 156630-3, "Steel for the reinforcement and prestressing of concrete-test methods-Part 3: Prestressing steel", (1991).

[5] Elices, M. y Sánchez Gálvez, V. "Relaciones entre corrosión bajo tensión y propiedades mecánicas", Hormigón y Acero, 128, 107-117, (1978).

[6] Elices, M. y Sánchez Gálvez, V., "El tercer simposio de la F.I.P sobre corrosión bajo tensión en aceros para pretensado", Hormigón y Acero, 144, 129-138, (1982).

[7] Beretta, S. y Mateazzi., S., "Short crack propagation in eutectoid steel wires", International Journal of Fatigue, 18(17), 451-456, (1996).

[8] Beretta, S. y Boniardi, N., "Fatigue strength and surface quality of eutectoid steel wires", International Journal of Fatigue, 21, 329-335, (1999).

[9] Fullea, J., Alonso C. y Andrade C., "Métodos experimentales para evaluar la susceptibilidad de los aceros de alta resistencia a la corrosión bajo tensión", Anales de la Mecánica de la Fractura, 18, 14-18, (2001).

[10] Beretta, S. y Murakami, Y., "Statistical analysis of defects for fatigue strength prediction and quality control of materials", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 21, 1049-1065, (1998).

[11] Norma ASTM "ASTM E1921: Standard Test Method for Determination of Reference Temperature for Ferritic Steels in the Transition Range", ASTM (1997).