INFLUENCIA DE LAS TENSIONES RESIDUALES EN EL ENSAYO FIP DE CORROSIÓN BAJO TENSIÓN DE LOS ALAMBRES DE PRETENSADO

J.M. Atienza, J. Ruiz, M. Elices

Departamento de Ciencia de Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos. Universidad Politécnica de Madrid
C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid

Resumen. La corrosión bajo tensión en las armaduras activas puede provocar la fractura de los alambres en condiciones subcríticas, produciendo fallos en estructuras pretensadas. Para garantizar el buen comportamiento del acero frente a la corrosión bajo tensión, la FIP propuso un ensayo estándar en tiocianato amónico. El objetivo de este trabajo es estudiar cómo influyen las tensiones residuales generadas en el proceso de fabricación de los alambres en los resultados del ensayo FIP de corrosión bajo tensión. Se han medido las tensiones residuales en la superficie de los alambres por difracción de rayos X. Además se ha simulado el procesado de los alambres para obtener su perfil de tensiones residuales y estudiar la carga a la que iban a ser sometidos en el ensayo de corrosión bajo tensión. Los resultados de este estudio muestran que el estado de tensiones residuales debe ser una variable de diseño fundamental a la hora de elegir el tipo de acero y exigirle cualidades. Además, parece muy interesante, para comprobar la aptitud del alambre con respecto a la corrosión bajo tensión, complementar los ensayos FIP normalizados (al 80% de la carga de rotura) con ensayos a distintos niveles de carga.

Abstract. Stress corrosion cracking in concrete reinforcing bars may produce wire fracture in subcritical conditions, leading to failure in pre-stressed structures. A standard test in ammonium thiocyanate was proposed by FIP to assess the wire resistance against stress corrosion. The aim of the present work is to investigate the effect of residual stresses generated by drawing in the stress corrosion behaviour of cold-drawn steel wires. Residual stresses were measured at the wire surface by X-ray diffraction. The drawing process was numerically simulated by finite elements. From that, the resulting residual stress profile was obtained. In addition, the loading process in the stress corrosion test was also simulated. The results show that the initial residual stress state must be considered as a key design parameter to choose the appropriate steel composition for best performance. In addition, it seems to be interesting to perform stress corrosion tests at loads different from the value proposed in the standard (80% of the tensile strength).

1. INTRODUCCIÓN

En la década de los 70 y 80 se produjeron una serie de fallos en estructuras pretensadas que fueron atribuidos a problemas de corrosión bajo tensión en las armaduras activas [1,2]. Se trataba de fracturas de alambres en condiciones subcríticas, es decir, sometidos a tensiones mucho menores que su resistencia a tracción. Esto despertó el interés por el estudio del fenómeno de la corrosión bajo tensión de los alambres trefilados tanto entre los fabricantes de acero como entre los proyectistas y constructores. Buena prueba de ello es que la Federación Internacional del Pretensado ha organizado tres congresos internacionales dedicados al tema, el último de los cuales se celebró en El Escorial (Madrid) en 1981 organizado por el Departamento de Ciencia de Materiales de la UPM. Fruto de estos estudios, la FIP propuso en 1978 un ensayo estándar, ensayo en Tiocianato Amónico, para determinar la susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno de aceros de pretensado y garantizar el buen comportamiento del acero frente a la corrosión bajo tensión.

No obstante, el ensayo FIP78 presenta una notable dispersión de resultados. Esta dispersión fue atribuida por diferentes estudios al estado superficial del alambre y especialmente a la presencia de tensiones residuales en su superficie [3-7]. Estos estudios mostraron que los alambres tenían un estado superficial de tensiones residuales probablemente provocado por el proceso de fabricación. La presencia de estas tensiones en la superficie, que se sumarían a las solicitaciones propias del pretensado, podrían acortar o alargar la vida del elemento bajo solicitaciones de corrosión bajo tensión, según fueran tensiones de tracción o de compresión respectivamente.

Sin embargo, estos estudios no disponían de un conocimiento completo sobre el perfil de tensiones residuales ni sobre cómo influían en ellas las diferentes variables y tratamientos del proceso de trefilado de alambres. Hoy en día, las mejoras introducidas en las

técnicas numéricas (elementos finitos) [8-11] y experimentales (medidas por difracción de rayos X y neutrones) [11,12] nos permiten un mejor conocimiento sobre el estado de tensiones residuales presente en los alambres.

El objetivo de este trabajo es combinar técnicas numéricas y experimentales para estudiar cómo influyen las tensiones residuales generadas en el proceso de fabricación de los alambres en los resultados del ensayo FIP de corrosión bajo tensión. Para ello se ha estudiado el comportamiento a corrosión bajo tensión de un alambre de acero de pretensar tal y como sale de la trefiladora sin ningún tratamiento posterior. Se han medido las tensiones residuales en la superficie de los alambres por difracción de rayos X. Por otro lado, utilizando el código de elementos finitos ABAQUS, se ha simulado el trefilado de los alambres para obtener su perfil de tensiones residuales y estudiar la carga a la que iban a ser sometidos en el ensayo de corrosión bajo tensión.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Material estudiado

El material se ha fabricado a partir de alambrón perlítico de 12 mm de diámetro, al que se somete a un proceso de trefilado en varias etapas. Después de pasar por ocho hileras de reducción se obtiene un alambre con un diámetro final de 5.20 mm, que es el empleado en este trabajo.

Las propiedades mecánicas convencionales se han determinado a partir de ensayos de tracción (cinco ensayos con rotura fuera de mordazas). Los resultados se muestran en la Fig. 1. Las propiedades mecánicas convencionales se muestran en la Tabla 1.

2.2. Medida de tensiones residuales

Las tensiones residuales se miden en la superficie de los alambres por difracción de rayos X. La distancia interplanar correspondiente a una familia de planos (hkl) puede calcularse por medio de la ley de Bragg. Para ello es preciso medir el ángulo 2θ al que se produce la reflexión para un valor dado de la longitud de onda incidente. Si el material tiene tensiones residuales la distancia interplanar es diferente del valor de referencia sin tensiones. A partir de estos datos puede calcularse la deformación longitudinal en la dirección del vector de dispersión –la bisectriz entre el rayo incidente y el reflejado- (dirección $\underline{L}_3$ en la Fig. 2), a partir de la siguiente fórmula:

$$(e'_{33})_{fy} = \frac{d_{fy} - d_0}{d_0} \qquad (1)$$

donde ε'_{33} es la deformación longitudinal en la dirección $\underline{L}_3$, $d_{\phi\psi}$ es el espaciado interplanar para una combinación dada de ángulos ϕ y ψ y d_0 el valor del espaciado cuando no existen tensiones residuales en el material.

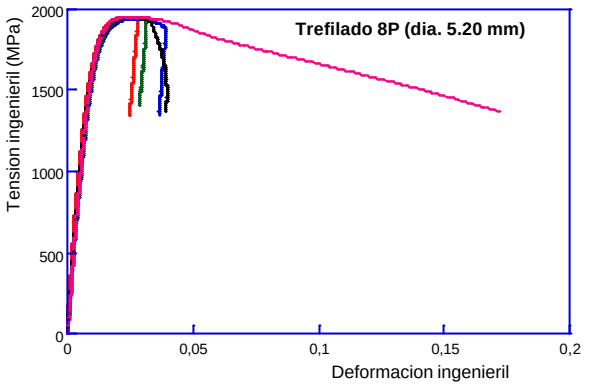


Fig. 1. Curvas tensión-deformación del alambre.

Si se supone que el material es isótropo y el estado tensional en la zona irradiada por los rayos X puede considerarse biaxial (es decir que las tensiones en la dirección normal a la superficie $\underline{S}_3$ son despreciables), la ecuación (1) se convierte en [13]:

$$(e'_{33})_{fy} = \frac{d_{fy} - d_0}{d_0} = \frac{1+u}{E}\, s_f \,\sin^2 y - \frac{u}{E}(s_{11} + s_{22}) \qquad (2)$$

donde σ_ϕ, σ_{11} y σ_{22} son las tensiones normales en las direcciones $\underline{S}_\phi$, $\underline{S}_1$ y $\underline{S}_2$ respectivamente (ver Fig. 2). Con la ecuación (2) puede calcularse σ_ϕ a partir de la pendiente del ajuste lineal de las medidas experimentales correspondientes a varios ángulos ψ, si se conocen las constantes elásticas E y ν y el espaciado interplanar de referencia d_0.

Las medidas de tensiones residuales se han realizado con un difractómetro Strainflex de la marca Rigaku. El sistema trabaja a un potencial de 30 kV y la intensidad de la corriente eléctrica suministrada al tubo generador de rayos X se ha fijado en 8 mA. Las medidas de difracción de rayos X se han llevado a cabo sobre la familia de planos (2,1,1) de la fase ferrita (α-Fe) del acero. Se ha empleado un tubo de rayos X con anticátodo de Cr, que emite las radiaciones características $K_{\alpha1}$, $K_{\alpha2}$ y K_β. A la entrada del detector se interpone un filtro capaz de absorber la radiación K_β (una lámina de Vanadio de 0.2 mm de espesor), con lo que sólo pasa la señal difractada proveniente de la radiación CrK_α. La longitud de onda correspondiente a ésta última es de 0.22909 nm, lo que produce un pico de difracción a un ángulo $2\theta_0 = 156.08^o$ para el espaciado interplanar de referencia de la familia de planos empleada. Los experimentos se han realizado en modo Ω, de manera que las rotaciones ψ y 2θ tienen el mismo eje (dirección $\underline{L}_2$ en la Fig. 2). La óptica utilizada es de

rayo paralelo, con fuentes de Soller de 1º de dispersión tanto en el tubo de rayos X como en el detector de centelleo.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del alambre.

Módulo de elasticidad E	190 GPa
Límite elástico al 0,2% $R_{p\,0,2}$	1720 MPa
Resistencia a tracción R_m	1940 MPa
Alargamiento bajo carga máxima ε_m	1.9 %

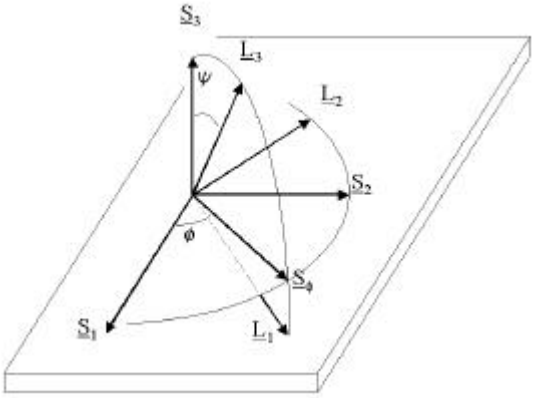


Fig. 2. Definición de los sistemas de referencia $\underline{L_i}$ (laboratorio), $\underline{S_i}$ (muestra) y los ángulos ϕ y ψ.

En este trabajo se han medido las tensiones residuales longitudinales de la fase ferrita del alambre (ϕ=0, por lo tanto $\underline{S_1}=\underline{S_\phi}$ es la dirección del eje del alambre) empleando diez valores del ángulo ψ (desde 12º hasta 57º aproximadamente) por medida. Se han realizado un total de 49 medidas de tensiones residuales longitudinales en 11 muestras de alambre antes de ser sometidas al ensayo de corrosión bajo tensión. Las medidas se realizaron a lo largo de varias generatrices correspondientes a la sección central de las muestras. Los resultados obtenidos se ajustan a una distribución de Gauss de valor medio igual a 250 MPa y desviación típica igual a 80 MPa.

2.3. Ensayos de corrosión bajo tensión

Los ensayos de corrosión bajo tensión se realizaron siguiendo la norma ISO/DIS 15630-3 [14]. En los citados ensayos se determina el tiempo de rotura de una muestra mantenida a una carga de tracción constante e inmersa en una disolución de tiocianato a una temperatura dada. La disolución utilizada es una disolución de 200 gramos de tiocianato amónico (NH_4SCN Carlo Erba, calidad reactivo de análisis) en 800 ml de agua desionizada.

En los ensayos realizados la carga se aplica por medio de una palanca en uno de cuyos extremos se encuentra la probeta fijada a un bastidor rígido y en el otro se colocan pesas hasta alcanzar la carga deseada. La disolución agresiva está contenida en una célula de corrosión de forma cilíndrica fabricada en PVC, rodeada por una camisa por la que circula agua a la temperatura necesaria para calentar la disolución. Las dimensiones de la célula se ajustan a lo especificado en la norma de ensayo. Para mantener constante la temperatura del agua se emplea un baño termostático, con un calentador y una bomba que hace circular el agua por la camisa de la célula. Las muestras empleadas en los ensayos son de 53 cm de longitud y la región del alambre inmersa en la disolución tiene 20 cm de longitud, de acuerdo con las recomendaciones de la norma.

Una vez cortada la muestra, se desengrasa con metil-etil-cetona y se deja secar al aire. Las zonas de contacto entre la probeta y la célula se protegen con una capa de cinta aislante para evitar la corrosión. La disolución agresiva se calienta a 50º C en un depósito intermedio. A continuación se coloca la probeta y se la somete a una carga de tracción cuyo valor es el 80% de la carga de rotura del alambre, y que se mantendrá constante durante todo el ensayo. Cargada la probeta, se introduce en la célula de corrosión la disolución agresiva precalentada. El llenado se realiza en menos de un minuto con objeto de evitar un descenso excesivo de la temperatura de la disolución. Durante el ensayo, la temperatura de la disolución se mantiene constante en 50 ± 1 º C.

En este trabajo se han realizado una serie de ensayos de corrosión bajo tensión normalizados y otros en los que únicamente se modificó la carga aplicada. El intervalo de cargas estudiado va desde el 80% al 6% de la carga de rotura P_r del alambre y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2 y en la Fig. 3.

Tabla 2. Tiempo hasta rotura (h) del alambre trefilado.

	0.8 P_r	0.6 P_r	0.4 P_r	0.2 P_r	0.06 P_r
	1.4	1.7	2.8	5.4	9.2
	1.6	1.8	3.5	5.5	10.7
	1.9	1.9	4.3		12.3
	2.1	2.2			
	2.2	2.3			
	2.2	2.5			
	2.3				
	2.5				
Media	**2.0**	**2.1**	**3.5**	**5.4**	**10.7**

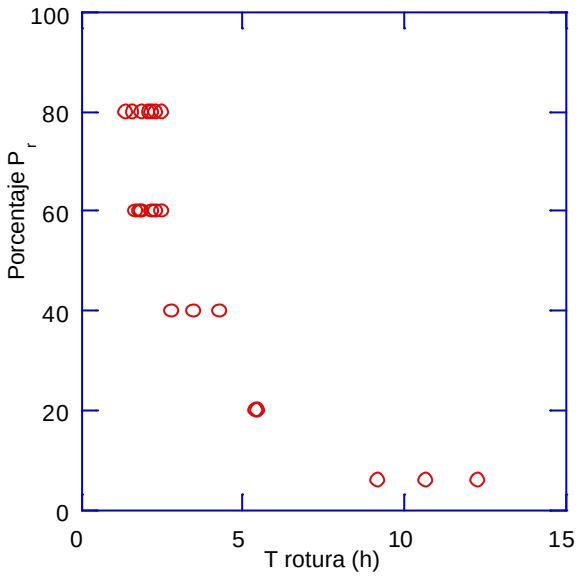


Fig. 3. Resultados de los ensayos de corrosión bajo tensión a distintos porcentajes de la carga de rotura

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

3.1. Tensiones residuales generadas por el trefilado

- Simulación del proceso de trefilado

Para estudiar las tensiones residuales generadas por el trefilado se ha creado un modelo numérico, utilizando el código de elementos finitos ABAQUS [15], que reproduce el paso del alambre a través de una matriz de trefilado. Se trata de un modelo que tiene en cuenta las partes mecánica y térmica del problema, no considerando la influencia de los posibles cambios de fase en el material, ya que las temperaturas alcanzadas durante el trefilado no superan los 210 ºC.

Las tensiones residuales surgen como consecuencia de la respuesta elástica del material a una distribución no homogénea de deformaciones plásticas. Por esta razón, el alambre ha sido modelizado como un material elastoplástico con endurecimiento por deformación. Este modelo reproduce adecuadamente el comportamiento mecánico del acero utilizado en el trefilado, que experimenta un gran endurecimiento por deformación. El dato de partida del modelo es la ley tensión-deformación del material previo a la última pasada de trefilado.

La hipótesis básica de los modelos elastoplásticos es que la deformación puede ser dividida en parte elástica y parte plástica. Se ha considerado que la respuesta plástica es incompresible y se ha comprobado que los elementos elegidos para discretizar el problema podían representar el comportamiento incompresible sin exhibir el problema del bloqueo volumétrico [16].

Finalmente, se ha utilizado un modelo de plasticidad independiente de la velocidad de deformación, con una superficie de plastificación con endurecimiento isotrópico, es decir, que cambia uniformemente en todas las direcciones. Como condición de plastificación se ha utilizado el criterio de von Mises, que reproduce bastante bien el comportamiento de los metales.

La simulación del proceso de trefilado se ha realizado forzando a pasar al material a través de la hilera, imponiendo el desplazamiento de la punta del alambre según la dirección de trefilado. Se ha considerado que esta es la opción que mejor reproduce el proceso industrial real, en el cual el alambre es obligado a pasar por la matriz de reducción tirando de su extremo.

La matriz ha sido modelizada como un material elástico con un módulo de elasticidad de 600 GPa, similar a la widia, que es material más utilizado para esta clase de herramientas. El contacto hilera-alambre se ha simulado mediante un coeficiente de rozamiento de Coulomb que varía entre 0,2 y 0,01.

- Comprobación del modelo numérico

Para comprobar que el modelo numérico predecía de forma adecuada las propiedades del alambre trefilado, se reprodujo con el programa de elementos finitos el paso del alambre a través de la última matriz de trefilado. La ley tensión-deformación del material introducida como dato de partida fue la del alambre después del paso por la penúltima matriz.

Una vez que todo el alambre había salido de la matriz se reprodujo con el modelo numérico un ensayo de tracción sobre el material trefilado. Durante el ensayo se controla el desplazamiento en la zona de la superficie del alambre y se obtiene la carga total y la deformación, simulando así los parámetros de control de un ensayo de tracción real. De esta forma se obtuvo la curva tensión-deformación del material trefilado (Fig. 4) y se comprobó que el programa predecía correctamente el comportamiento del alambre después del procesado, recogiendo tanto el momento de pérdida de linealidad de la curva tensión-deformación, como el límite elástico convencional y la tensión máxima.

- Tensiones residuales en el alambre trefilado

El cálculo de las tensiones residuales se realiza al final del proceso, una vez que el alambre ha salido completamente de la matriz y en una zona donde se ha alcanzado el estado estacionario, es decir, se desprecian las zonas inicial y final del alambre trefilado.

En este análisis se ha supuesto que el perfil final de tensiones residuales del alambre depende fundamentalmente de la última pasada de trefilado, lo cual tiene sentido si consideramos que en cada pasada de trefilado el material es sometido a una importante deformación plástica (el porcentaje de reducción de sección por paso suele ser del 20%).

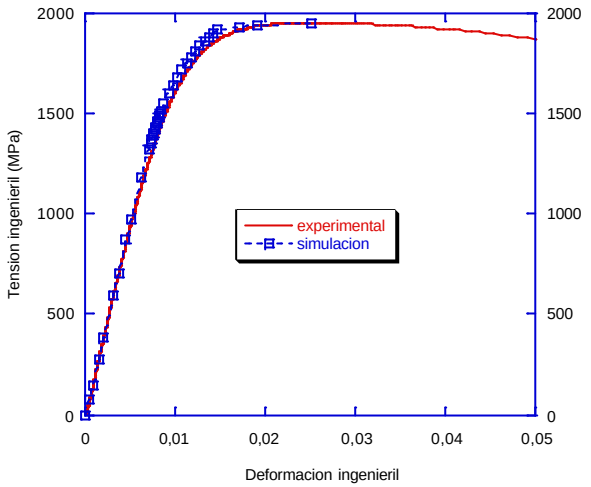


Fig. 4. Comparación de las curvas tensión-deformación obtenidas experimentalmente y en la simulación numérica.

Los resultados de la simulación numérica muestran que el paso por una matriz de trefilado genera en el alambre un perfil de tensiones residuales longitudinales axisimétrico, con tracciones en la superficie y compresiones en el centro (Fig. 5).

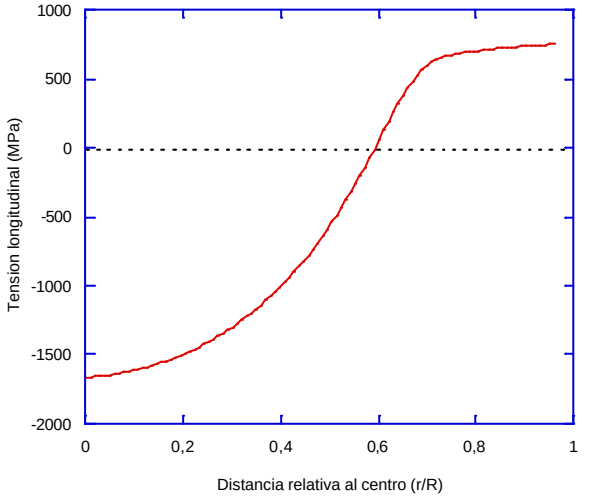


Fig. 5. Perfil de tensiones residuales longitudinales generado por el trefilado.

3.2. Carga durante los ensayos de corrosión bajo tensión

Una vez obtenido el perfil de tensiones residuales, se simuló la puesta en carga del alambre en el ensayo de corrosión bajo tensión.

En la Fig. 6 se representan los perfiles de tensiones obtenidos después de someter al alambre trefilado a distintas cargas (expresadas como porcentaje de la carga de rotura Pr).

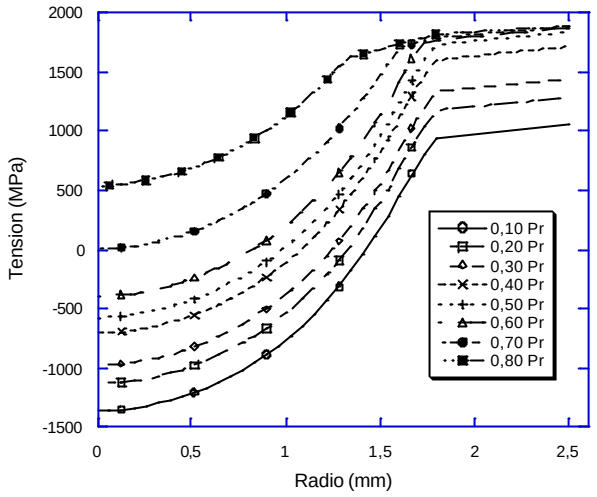


Fig. 6. Perfiles de tensiones del alambre trefilado al ser sometido a diferentes cargas (expresadas como porcentaje de la carga de rotura Pr).

Al sumar la tensión aplicada a la tensión residual se produce la plastificación en la superficie del alambre para las cargas más altas. Un incremento de la carga entre el 50% y el 80% de la carga de rotura no produce prácticamente cambios en la tensión a la que está sometido el alambre en la región superficial, que es la crítica en los ensayos de corrosión bajo tensión.

4. DISCUSIÓN

Las tensiones residuales longitudinales medidas en la fase ferrita del alambre fueron 250±80 MPa. Sin embargo, el valor que predice la simulación numérica del proceso de trefilado en la superficie del alambre (ver Fig. 5) se encuentra alrededor de 700 MPa. La diferencia reside en que en la simulación se calcula la tensión residual total, a la que contribuyen también las tensiones en la fase cementita, que no han podido medirse experimentalmente. Las tensiones residuales en la fase cementita, estimadas a partir de la regla de las mezclas (88% de ferrita y 12% de cementita) están en torno a los 3500 MPa (lo cual se corresponde con las medidas experimentales realizadas por difracción de neutrones sobre alambres perlíticos trefilados) [12, 17].

Los resultados de los ensayos de corrosión bajo tensión muestran que no hay grandes diferencias en los tiempos de rotura para cargas comprendidas entre el 40% y el 80% de la carga de rotura del alambre (Fig. 3). La explicación hay que buscarla en la existencia de un perfil inicial de tensiones residuales con tracciones en la superficie del material. Estas tracciones se suman a la carga a la que es sometido el alambre durante el ensayo y, como muestran los resultados del modelo numérico, provocan la plastificación superficial para cargas superiores al 50% de la carga de rotura (Fig. 6). Esto hace que, durante el ensayo, el alambre esté sometido en su superficie a tensiones similares al cargarlo entre el 50% y el 80% de la carga de rotura, por lo que los tiempos de rotura son también parecidos.

6. CONCLUSIONES

La presencia de un perfil de tensiones residuales en el alambre trefilado, con tracciones en la superficie y compresiones en el interior, tiene una influencia fundamental en su comportamiento en los ensayos de corrosión bajo tensión. Estas tensiones se suman a la carga a la que es sometida la probeta durante el ensayo, aumentando las tensiones que realmente aguanta el alambre en su zona superficial (la responsable de la corrosión bajo tensión), pudiendo incluso llegar a provocar su plastificación en esa zona aún cuando las cargas a las que esté sometida la probeta sean muy pequeñas.

De los resultados de este estudio se deduce que el estado de tensiones residuales debe ser una variable de diseño fundamental a la hora de elegir el tipo de acero y exigirle cualidades.

Además, parece muy interesante para comprobar la aptitud del alambre con respecto a la corrosión bajo tensión el complementar los ensayos FIP normalizados (al 80% de la carga de rotura) con ensayos a distintos niveles de carga.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a D. Luis del Pozo de EMESA-TREFILERIA el material suministrado y su apoyo para la presente investigación. También desean agradecer la contribución de los fondos FEDER UNPM00-33-003 y FEDER UNPM00-33-004, que nos han permitido mejorar el equipamiento de nuestro laboratorio y su infraestructura.

REFERENCIAS

[1] M. Elices. "El acero en la prefabricación pretensada". Hormigón y Acero, nº. 124, pp. 105-112, 1977.

[2] M. Elices. "Patología y terapéutica de las armaduras activas en el hormigón pretensado". Informes de la Construcción, vol. 40, nº 396, 1988.

[3] M. Elices, V. Sánchez-Gálvez. 'Relaciones entre corrosión bajo tensión, doblados y torsiones alternas". Hormigón y Acero nº. 121, pp. 137-143, 1976.

[4] M. Elices, G. Maeder, V. Sánchez-Gálvez. "Effect of surface residual stress on hydrogen embrittlement of prestressing steels". Br. Corrosion Journal, vol. 18, pp. 80-81, 1983.

[5] J.M. Campos, M. Elices. "Influencia de las tensiones residuales en la fragilación por hidrógeno de alambres trefilados". Anales de la Mecánica de la Fractura, vol.4, pp. 251-256, 1986.

[6] J.M. Campos, M. Elices. "Tensiones residuales internas en alambres trefilados". Anales de la Mecánica de la Fractura, vol. 4, pp. 143-157, 1987.

[7] J. Llorca, V. Sánchez-Gálvez. "Numerical determination of the influence of residual stresses on fatigue". Computational Plasticity, pp. 1123-1136, Barcelona 1997.

[8] P. Renz, W. Steuff , R. Kopp. "Possibilities of influencing residual stresses in drawn wires and bars". Wire Journal International, pp. 64-69, enero 1996.

[9] N.W. Bonner, T.M. Holden, G. Mills, G.F. Modlen, P.J. Webster. "Residual stresses in multipass cold drawing of high carbon steel wire". Euro. Conf. Residual Stresses-4, pp. 755-763, 1996.

[10] J. Gerhardt, A.E. Tekkaya. "Applications of the finite element method on the determination of residual stresses in drawing and extrusion". Computational Plasticity, pp. 1037-1050, Barcelona 1997.

[11] J.M. Atienza. "Tensiones residuales en alambres de acero trefilados". Tesis doctoral, 2001.

[12] K. Van Acker, J. Root, P. Van Houtte, E. Aernoudt. "Neutron diffraction measurement of the residual stress in the cementite and ferrite phases of cold drawn steel wires". Acta Metall., vol. 44, pp. 4039-4049, 1996.

[13] I. C. Noyan y J. B. Cohen. Residual Stress. Measurement by Diffraction and Interpretation. Ed. Springer-Verlag, 1987.

[14] Normas ISO "ISO 15630-3: Steel for the reinforcement and prestressing of concrete-Test methods" ISO (2002).

[15] Hibbitt, Karlsson, Sorensen. Manual de ABAQUS. Versión 5.8, 1998.

[16] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. The Finite Element Method. Ed. McGraw-Hill, 9ª edición, 1989.

[17] Atienza, J.M., Elices, M., Ruiz, J., Martínez, M., García-Hernández, M., Mompeán, F.J.. "Residual stresses in cold drawn pearlitic wires" (enviado a J. Materials Science).