

INFLUENCIA DE LAS TENSIONES Y DEFORMACIONES RESIDUALES SUPERFICIALES EN LA DURABILIDAD DE ALAMBRES DE PRETENSADO EN AMBIENTE DE HIDRÓGENO

M. Lorenzo¹, V. Kharin², J. Toribio²

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Salamanca
E. T. S. de Ingeniería Industrial. Avda. Fernando Ballesteros, 2 37700 Béjar (Salamanca).
E-mail: mlorenzo@usal.es

² Departamento de Ingeniería de Materiales, Universidad de Salamanca
E.P.S., Campus Viriato, Avda. Requejo 33, 49022 Zamora

RESUMEN

Como es bien sabido los aceros de pretensado son altamente susceptibles a la *fragilización por hidrógeno* (FH). En este proceso el estado tensodeformacional residual producido por el trefilado juega un papel esencial, puesto que condiciona la difusión de hidrógeno hacia determinadas zonas del material. De esta forma, las variaciones producidas en este estado tensodeformacional debidas a cambios en las condiciones del proceso de trefilado pueden modificar la vida en servicio de estos componentes estructurales. En este estudio se ha analizado el efecto en la FH de diferentes perfiles de tensiones hidrostáticas idealizados considerando en la superficie del alambre diferentes estados de tracción y compresión. Los resultados de este estudio permiten determinar la importancia de los estados tensodeformacionales en la superficie del alambre en los procesos de FH.

ABSTRACT

It is well known that prestressing steels are highly susceptible to *hydrogen embrittlement* (HE). Stress and strain states, produced by wire drawing, play an essential role in this process because stress and strains fields affect hydrogen diffusion towards specific places in the material. Therefore a variation on stress and strain fields, due to changes in wire drawing process conditions, could modify the life in service of these structural components. In this work the effect on HE of different idealized hydrostatic stresses profiles is analyzed taking into account distributions at wire surface with both tensile and compressive stress states. Results of present work demonstrate the key role of residual stress and strains states on HE process.

PALABRAS CLAVE: Estado tensodeformacional residual, fragilización por hidrógeno.

1. INTRODUCCIÓN

Los aceros trefilados de alta resistencia se utilizan ampliamente en la ingeniería civil como elementos de refuerzo en estructuras de hormigón pretensado. Se obtienen mediante un proceso de conformación plástica en frío denominado trefilado en el que se reduce de forma progresiva la sección del alambre. Las principales consecuencias mecánicas del procedimiento de fabricación son un aumento notable de la resistencia mecánica del acero [1,2]. Además, durante el conformado, el alambre sufre deformaciones plásticas no uniformes que originan la aparición de un estado tensional residual [3,4].

De acuerdo con los resultados del análisis pionero [5] estos estados residuales pueden condicionar la vida en servicio de estos alambres en ambientes agresivos. Los

estados de compresión en la superficie del alambre retardan la fisuración mientras que, por el contrario, los estados de tracción favorecen la aparición de fisuras que pueden producir la rotura del alambre mediante un proceso de crecimiento subcrítico por fatiga o por corrosión bajo tensión [6]. Por este motivo se suelen aplicar diversos procesos que generan estados de compresión en la superficie de los alambres tales como el granallado [7].

Pero es en ambientes agresivos donde aparece un tipo de fractura a la que estos alambres de acero son especialmente susceptibles, la denominada *fragilización por hidrógeno* (FH) [8]. En este tipo de fractura tanto las tensiones residuales como las deformaciones plásticas juegan un papel determinante en el proceso de daño que conduce a la fractura final [3,5].

El proceso de FH se desarrolla en diferentes etapas: transporte de hidrógeno molecular a la superficie del alambre, adsorción, disociación de la molécula en hidrógeno atómico, absorción de dichos átomos hacia el interior del alambre y finalmente transporte hacia determinados puntos del material donde se acumula hasta alcanzar una determinada concentración crítica que corresponde a la fractura a nivel microestructural [5,8]. Los estados tensodeformacionales en la superficie del alambre son decisivos en dos de las etapas en las que se desarrolla la FH: la acumulación de hidrógeno en la superficie del alambre y su posterior difusión hacia el interior de éste.

De esta forma se plantea el principal objetivo de este estudio: determinar los efectos en los procesos de FH del estado tensodeformacional que presenta un alambre en la superficie.

2. CASOS DE ESTUDIO

Para alcanzar el objetivo planteado se ha idealizado el estado tensodeformacional residual que presenta un alambre trefilado. La forma del perfil se ha elegido a partir de los perfiles empleados en el estudio [5] mostrado en la Fig. 1. Dicho perfil se puede dividir en dos zonas: en la primera, situada entre la superficie y una determinada profundidad x_0 , la tensión hidrostática varía de forma lineal desde la superficie y en la segunda zona, que se extiende entre la profundidad x_0 y el centro del alambre, el valor de la tensión hidrostática es uniforme.

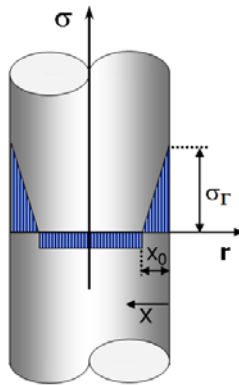


Figura 1. Esquema de los perfiles idealizados de tensiones hidrostáticas.

Por tanto para definir completamente el perfil idealizado sólo son necesarios dos parámetros: la tensión hidrostática en la superficie σ_r y la profundidad x_0 . Para determinar el efecto de la magnitud tensional en la superficie y de su signo se han considerado seis perfiles de tensiones hidrostáticas diferentes en los que se ha variado la magnitud en la superficie para cada uno de

los estados tensionales posibles: tracción (Tabla 1) y compresión (Tabla 2).

Tabla 1. Tensiones superficiales $\sigma_r > 0$ y profundidad x_0 en los perfiles teóricos con tracciones en la piel del alambre.

Perfil	I	II	III	IV	V	VI
σ_r (MPa)	100	200	500	800	1000	1200
x_0 (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Tabla 2. Tensiones superficiales $\sigma_r < 0$ y profundidad x_0 en los perfiles teóricos con compresiones en la piel del alambre.

Perfil	VII	VIII	IX	X	XI	XII
σ_r (MPa)	-100	-200	-500	-800	-1000	-1200
x_0 (mm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Finalmente, para completar la definición del estado tensodeformacional de los alambres analizados, resulta necesario definir la distribución de la deformación plástica. En este caso se ha adoptado una distribución uniforme a lo largo de la sección del alambre. El valor de dicha deformación se ha calculado a partir de los resultados del estudio [3] en el que las deformaciones plásticas obtenidas en la simulación del proceso de trefilado eran similares a las obtenidas con la ecuación (1) derivada de la hipótesis de conservación de volumen

$$\varepsilon_p^{(i)} = \ln \left[\frac{d_0}{d_i} \right]^2 \quad (1)$$

donde ε_p representa la deformación plástica acumulada, d_0 es el diámetro inicial del alambre antes del trefilado y d_i es el diámetro del alambre después del paso de trefilado (i). Los alambres de acero analizados en este estudio corresponden al último paso de un proceso de trefilado en el que se ha reducido la sección del alambre desde un diámetro inicial de 12 mm hasta un diámetro final de 7 mm y por tanto los alambres estudiados, de acuerdo con la ecuación (1), tendrán una deformación plástica equivalente de 1.08.

3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

La forma más adecuada para obtener el objetivo planteado es mediante la modelización numérica del proceso de difusión de hidrógeno asistida por el estado tensodeformacional. En este modelo se considera que el flujo de hidrógeno en el interior del material viene gobernado por la ecuación de difusión de Fick modificada (ecuación (2)) en la que se incluyen dos términos que añaden el efecto del campo tensional, representado por el gradiente de tensiones hidrostáticas

$(\nabla\sigma)$, y el efecto de las deformaciones plásticas, incluido de forma indirecta a través de la solubilidad de hidrógeno en el metal que, tal como se muestra en la ecuación (3) basada en estudios previos [5], depende de la deformación plástica (ϵ_p).

$$\mathbf{J} = -D(\epsilon_p) \left\{ \nabla C - C \left[\Omega \nabla \sigma + \frac{\nabla K_{se}(\epsilon_p)}{K_{se}(\epsilon_p)} \right] \right\} \quad (2)$$

$$K_{se}^{(i)}(r) = 1 + 4\epsilon_p^{(i)}(r) \quad (3)$$

donde K_{se} representa la componente de la solubilidad dependiente de la deformación plástica.

La concentración en la superficie del alambre se puede considerar que viene dada por la solución de la ecuación diferencial (1) en el estado estacionario cuya solución analítica se determina por la expresión

$$C_{eq} = K_{se}(\epsilon_p) e^{\Omega\sigma} \quad (4)$$

La simulación del proceso de difusión establece la necesidad de definir otros parámetros que intervienen, como por ejemplo la temperatura ($T = 323$ K) y el volumen parcial molar de hidrógeno en el acero $v_H = 2$ cm³/mol [9]. Otro factor que influye en la difusión de hidrógeno es la difusividad. Este parámetro es altamente sensible a los cambios producidos a nivel microestructural, así como a los producidos por las deformaciones plásticas del material [9,10,11]. Existen estudios en los que se estima que la difusividad de hidrógeno en aleaciones BCC a temperaturas inferiores a 500 K está comprendida entre 10^{-13} a 10^{-8} m²/s [10]. El valor del coeficiente de difusión de hidrógeno en el alambre se puede tomar a partir de los resultados del estudio [5] para el acero final fuertemente trefilado analizado en este estudio: $\langle D \rangle^{(6)} = 4.99 \cdot 10^{-12}$ m²/s.

Las distribución de tensiones hidrostáticas y las deformaciones plásticas equivalentes son similares en todas las secciones del alambre [3], i.e., se repiten para cualquier coordenada z , cf. Figura 1. Por este motivo se ha considerado que la aproximación unidimensional (1D) del modelo de difusión asistida por el estado tensodeformacional es la más adecuada para el estudio planteado en este trabajo, puesto que en estas condiciones el flujo se producirá exclusivamente en la dirección radial (r) del alambre, no interviniendo la coordenada z [12].

4. DISTRIBUCIONES DE HIDRÓGENO

Los resultados de la simulación del proceso de difusión asistida por el estado tensodeformacional permiten conocer las distribuciones de hidrógeno a lo largo de la sección del alambre en los diferentes instantes de

tiempo en los que se desarrolla el proceso de difusión. En todos los perfiles de tensiones analizados el proceso de difusión presenta un patrón común que, a modo de ejemplo, se muestra en la Figura 2 para dos de los casos estudiados (perfiles IV y IX, con estados tensionales superficiales de tracción y compresión respectivamente). En dicha Figura se representa la evolución de las concentraciones relativas de hidrógeno en diferentes instantes de tiempo del proceso de difusión.

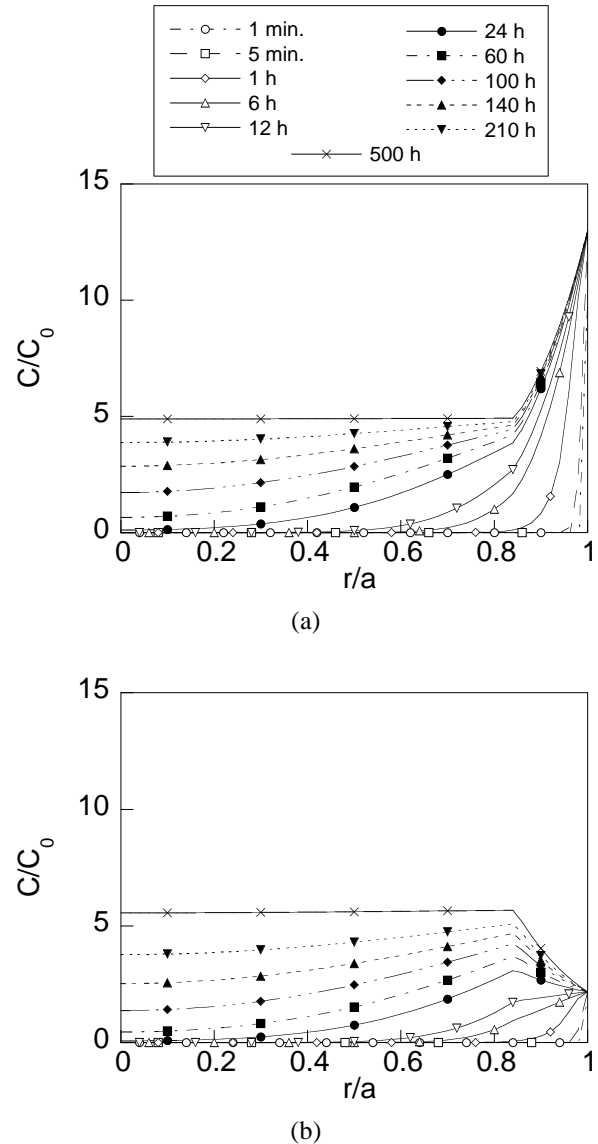


Figura 2. Evolución de la distribución de la concentración relativa de hidrógeno a lo largo del proceso de difusión en el alambre con el perfil de tensiones de compresión IV (a) y de tracción IX (b).

Tanto en los alambres con perfiles de tensiones residuales de tracción o compresión en la superficie (Figuras 2a y 2b respectivamente) se puede observar cómo se produce el proceso de acumulación de hidrógeno de forma progresiva desde la superficie hacia el interior del alambre hasta alcanzar una distribución estacionaria en la que los distintos puntos de la sección

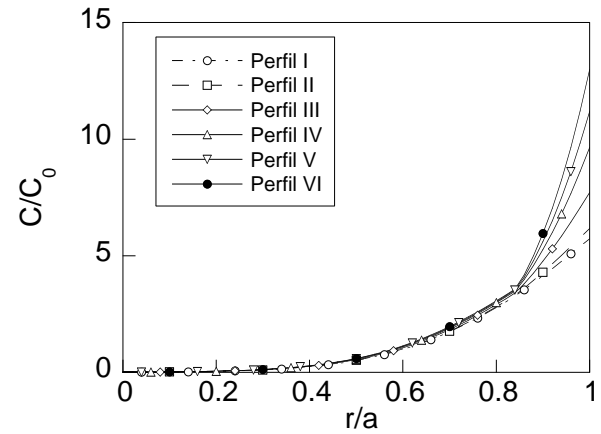
alcanzan la concentración máxima admisible que viene dada por la ecuación (4). En ambos casos el perfil de concentración de hidrógeno en el estado estacionario (tiempos de difusión largos) presenta una forma similar a la distribución idealizada del perfil de tensiones hidrostáticas.

No obstante, las distribuciones de hidrógeno obtenidas en los alambres con estados en la superficie de tracción y compresión presentan diferencias que pueden condicionar su integridad estructural durante su vida en servicio. En los perfiles con estados de tracción los valores de la concentración de hidrógeno más altos se localizan en una zona próxima a la superficie del alambre ($0.8 < r/a < 1$) donde la concentración estacionaria se alcanza a tiempos de difusión cortos ($t < 24$ h).

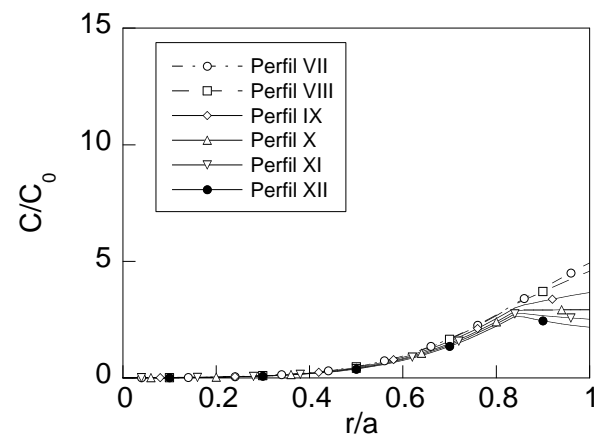
Por el contrario, en los perfiles con estados de compresión en la superficie el tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario en la misma zona es sensiblemente mayor ($t > 100$ h). Esto, unido a que en dicha zona las concentraciones de hidrógeno son inferiores a las obtenidas en los perfiles de tracción, hace pensar que los alambres que presentan estados de compresión en la superficie tendrán una susceptibilidad menor a la acción de daño producida por el hidrógeno. Esto se debe a dos factores: por un lado la concentración en la zona donde potencialmente puede aparecer el daño por hidrógeno ($0.9 < r/a < 1$) es menor (y por tanto es menos probable que alcance la concentración crítica dada por el criterio de fractura) y por otro lado el tiempo necesario para alcanzar la concentración máxima admisible es mayor.

Para completar este análisis resulta interesante estudiar la influencia del valor de la tensión hidrostática en la superficie (σ_r) en las distribuciones de hidrógeno a lo largo de la sección del alambre. Para ello se han representado en la Figura 3 dichas distribuciones obtenidas para tiempos de difusión medios ($t = 35$ h, antes de alcanzar el estado de estacionario en todos los puntos del alambre) para cada uno de los seis perfiles de tracción (Figura 3a) así como para los seis perfiles de compresión analizados (Figura 3b).

En dichas Figuras se puede apreciar cómo aparecen en las distribuciones de la concentración de hidrógeno dos zonas claramente diferenciadas tanto en los alambres con estados tensionales de tracción en la superficie (Figura 3a) como en los alambres con estados tensionales de compresión (Figura 3b). Por un lado, la primera es la zona próxima a la superficie del alambre ($0.8 < r/a < 1$) donde existen claras diferencias entre los casos analizados y por otro la segunda corresponde a la zona interior del alambre ($r/a < 0.8$) donde las diferencias son apenas apreciables en las distribuciones de hidrógeno obtenidas en los alambres con estados tensionales de tracción y ligeramente más acusadas en las proximidades de la coordenada $r/a=0.8$ en los alambres con estados tensionales de compresión.



(a)



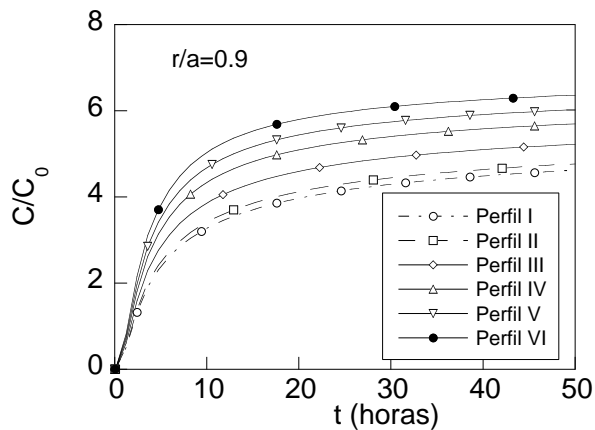
(b)

Figura 3. Distribución de la concentración relativa de hidrógeno en el alambre con los perfiles de tensiones de tracción: I, II, III, IV, V y VI (a) y compresión: VII, VIII, IX, X, XI y XII (b) (tiempo de difusión medio $t=35$ h).

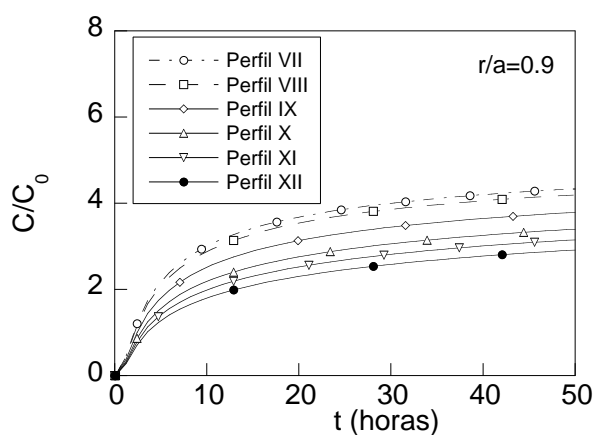
El análisis de las diferencias observadas en la primera zona ($0.8 < r/a < 1$) revela la importancia del tipo de estado tensional en la superficie del alambre (tracción o compresión), puesto que los efectos que se generan en los procesos de acumulación de hidrógeno son contrarios dependiendo de si el estado tensional en la superficie es de tracción o compresión. En el primero de los casos (estados de tracción en la superficie) se puede ver claramente en la Figura 3 cómo aumenta la concentración de hidrógeno en la zona potencialmente peligrosa [5] ($0.8 < r/a < 1$) a medida que aumenta el valor de la tensión en la superficie alcanzando el valor máximo en el alambre con la tensión más alta (perfil VI). Por el contrario en las distribuciones de hidrógeno obtenidas en los alambres con estados de compresión en la superficie la tendencia con el valor de la tensión en la superficie (en valor absoluto) es inversa, *i.e.*, la concentración de hidrógeno en la zona de análisis ($0.8 < r/a < 1$) decrece a medida que aumenta el valor de

la tensión en la superficie en valor absoluto tomando el valor mínimo en el alambre XII en el que la tensión en la superficie es la máxima de los perfiles de compresión considerados. Por estos motivos parece adecuado pensar que el efecto observado anteriormente en la Figura 2 se ve intensificado de forma gradual por el valor de la tensión que presenta el alambre en la superficie. De esta forma el efecto es muy acusado en los casos en los que se han considerado los estados tensionales más altos (perfiles VI y XII) y es muy reducido en los alambres con estados tensionales más bajos (perfiles I y VII) en los que las variaciones producidas son sensiblemente menores.

Para completar el estudio resulta interesante analizar (Figura 4) la evolución a lo largo del tiempo de difusión de la concentración de hidrógeno en un punto central ($r/a=0.9$) de la zona donde, de acuerdo con los estudios de otros autores [5], previsiblemente aparecerá el efecto del daño por hidrógeno a nivel microestructural.



(a)



(b)

Figura 4. Evolución temporal de la distribución de la concentración relativa de hidrógeno para puntos próximos a la superficie del alambre ($r/a=0.9$) con los perfiles de tensiones de tracción: I, II, III, IV, V y VI (a) y compresión: VII, VIII, IX, X, XI y XII (b).

En la Figura 4 se puede ver cómo se produce el proceso de acumulación de hidrógeno a lo largo del tiempo de exposición de forma similar en los dos tipos de alambre analizados en los que se considera estados de tracción y compresión en la superficie del alambre: la concentración de hidrógeno crece de forma progresiva (cuasi-lineal para tiempos cortos de difusión) hasta alcanzar el valor máximo admisible correspondiente al estado estacionario para tiempos largos de exposición al ambiente agresivo (cf. ecuación (4)). No obstante a pesar de dicha similitud las diferencias observadas previamente en las Figuras 2 y 3 también se pueden apreciar en la Figura 4. De esta forma los puntos situados a la profundidad $r/a=0.9$ en los alambres con estados de tracción en la superficie alcanzan una concentración de hidrógeno mayor a medida que aumenta el valor de la tensión en la superficie mientras que, por el contrario, en los alambres con estados de compresión en la superficie la concentración de hidrógeno es menor a medida que aumenta, en valor absoluto, el valor de la tensión en la superficie del alambre.

Pero la información que proporciona la Figura 4 va más allá, puesto que permite conocer de forma cualitativa la velocidad de acumulación de hidrógeno en la posición $r/a = 0.9$ de los alambres estudiados a través de la pendiente de las curvas mostradas en la Figura 4. De esta forma se puede observar que la velocidad de acumulación de hidrógeno en esa posición aumenta con el valor de la tensión en la superficie en los casos en los que el alambre presenta estados de tracción en la superficie mientras que, por el contrario, disminuye al aumentar dicho valor cuando los alambres presentan estados de compresión en la superficie.

Por tanto se puede considerar que en los alambres con estados de tracción en la superficie el proceso de acumulación de hidrógeno es más rápido. Por el contrario en los alambres con estados de compresión en la superficie el proceso de acumulación de hidrógeno se ralentiza. Esto reafirma los efectos observados previamente en las Figuras 2 y 3: los estados de tracción en la superficie hacen que los alambres sean más propensos a los fenómenos de FH no solo por alcanzar concentraciones de hidrógeno más elevadas (y por tanto probablemente más próximas a la concentración crítica dada por el criterio de fractura) sino que además los niveles altos de concentración de hidrógeno se alcanzan antes. Mientras que, por el contrario, los alambres con estados de compresión en la superficie el efecto es opuesto al de los alambres con estados de tracción: la susceptibilidad a los procesos FH es menor tanto por tener valores de concentraciones sensiblemente inferiores a los de tracción (y por tanto más alejados del valor de la concentración crítica) como por alcanzar los valores de la concentración de hidrógeno más lentamente. En ambos casos el valor de la tensión hidrostática en la superficie actúa como un intensificador de dicho efecto.

5. CONCLUSIONES

Los resultados demuestran la importancia de los estados tensodeformacionales superficiales en la fragilización por hidrógeno (FH) de los alambres. Las tensiones residuales de tracción superficial son potencialmente peligrosos para la integridad estructural en ambientes agresivos del alambre, puesto que favorecen la acumulación de hidrógeno en las proximidades de su superficie donde cabe esperar que los procesos de daño por hidrógeno a nivel microestructural tengan lugar. Esta acumulación es mayor a medida que aumenta el valor de la tensión en la superficie. Por el contrario los estados de tensión de compresión en la superficie producen el efecto contrario: la acumulación de hidrógeno es menor a medida que aumenta el valor de esta tensión en valor absoluto. Por lo que se puede pensar que los estados de compresión son adecuados para impedir la entrada de hidrógeno y reducir la acumulación de este elemento en las cercanías de la superficie. Esto supone una mejora de la vida en servicio de estos alambres en ambientes agresivos puesto que la susceptibilidad al fallo por FH de estos alambres se ve reducida.

Los resultados también permiten establecer una relación entre la magnitud de la tensión hidrostática en la superficie y la velocidad de acumulación de hidrógeno en los puntos donde potencialmente aparece el daño, dependiendo del tipo de tensión (tracción o compresión) presente en la superficie del alambre. En el caso de los alambres con estados de tracción la acumulación de hidrógeno es más rápida en aquellos perfiles de tensiones con estados superficiales más altos, mientras que en los perfiles de compresión la tendencia es inversa: la acumulación es más lenta a medida que aumenta el valor absoluto de la tensión en la superficie.

Por tanto finalmente se puede considerar que los estados tensionales de compresión reducen la concentración de hidrógeno en la zona próxima a la superficie del alambre y ralentizan el proceso de acumulación de hidrógeno en dicha zona, siendo este efecto mayor a medida que aumenta el valor de la tensión. Así pues, la susceptibilidad a los procesos de daño por hidrógeno de los alambres con estados de compresión en la superficie es menor y por tanto cabe esperar un aumento de su vida en servicio en presencia de ambientes agresivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación aportada por las siguientes instituciones: Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCYT; MAT2002-01831), Ministerio de Educación y Ciencia (MEC; BIA2005-08965), Ministerio de Ciencia e Innovación (MCINN; BIA2008-06810), *Junta de Castilla y León* (JCyL; SA067A05, SA111A07 y SA039A08).

REFERENCIAS

- [1] J. Toribio, Relationship between microstructure and strength in eutectoid steels. *Mater. Sci. Engng. A* **387-389**, 227-230, 2004.
- [2] J. Toribio and E. Ovejero, Effect of cumulative cold drawing on the pearlitic interllmellar spacing in eutectoid steel. *Scripta Mater.* **39**, 323-328, 1998.
- [3] M. Lorenzo, D. Vergara, V. Kharin y J. Toribio, Influencia del estado tensodeformacional residual en la fragilización por hidrógeno de alambres trefilados. *Anal. Mec. Fract.* **24**, 123-129, 2007.
- [4] J. M. Atienza, *Tensiones residuales en alambres de acero trefilados*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [5] J. Toribio and M. Elices, Influence of residual stresses on hydrogen embrittlement susceptibility of prestressing steels. *Int. J. Solids Struct.* **28**, 791-803, 1999.
- [6] S. Suresh, "Fatigue of materials". Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [7] ASM Handbook Volume 5, "Surface engineering", ASM International, Materials Park, OH, 2007.
- [8] F. Bergsma, J.W. Boon, and C.F Etienne, Détermination de la sensibilité des aciers précontrains à la fragilisation par l'hydrogène. *Rev. Metall.* **75**, 153-164. 1978.
- [9] J. P. Hirth, Effects of hydrogen on the properties of iron and steel. *Metall. Trans.* **11A**, 861-890, 1980.
- [10] B. A. Kolachev, *Hydrogen Brittleness of Metals*. Metallurgia, Moscow, 1985.
- [11] R.S. Lillard, D.G. Enos and J.R. Scully, Calcium hydroxide as a promoter of hydrogen absorption in 99.5% Fe and a fully pearlitic 0.8% C steel during electrochemical reduction of water. *Corrosion* **56**, 1119-1132, 2000.
- [12] D. Vergara, M. Lorenzo, V. Kharin y J. Toribio, Análisis de la direccionalidad de la difusión de hidrógeno en las proximidades de entallas. *Anal. Mec. Fract.* **24**, 453-458, 2007.