

## EVOLUCIÓN GEOMÉTRICA DE LA ZONA TTS CON EL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL HIDRÓGENO

D. Vergara<sup>1</sup>, R. Gil<sup>2</sup> y J. Toribio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Salamanca  
E.P.S., Campus Viriato, Avda. Requejo 33, 49022 Zamora  
Tel: (980) 54 50 00; Fax: (980) 54 50 02, Correo-e: dvergara@usal.es

<sup>2</sup> Ingeniería de Materiales, Universidad de Salamanca  
E.P.S., Campus Viriato, Avda. Requejo 33, 49022 Zamora

### RESUMEN

Los aceros perlíticos sometidos a ambientes de *fisuración asistida por hidrógeno* (FAH) presentan una fractografía típica denominada en inglés *tearing topography surface* (TTS) que está vinculada a la difusión del hidrógeno en el interior del material. El tamaño y geometría de las zonas afectadas por el hidrógeno influye directamente en el comportamiento en fractura de los aceros perlíticos sometidos a ambientes hidrogenantes, siendo por lo tanto un importante aspecto a estudiar desde el punto de vista de la Mecánica de Fractura. El presente trabajo se ha basado en la influencia que ejerce en el aspecto geométrico de estas zonas TTS el tiempo de exposición del acero al hidrógeno. Además, asumiendo que la forma que adoptan estas zonas TTS es la elíptica, se ha cuantificado la evolución que sufren los ejes de dicha geometría con la velocidad de sollicitación, viéndose que el tiempo de exposición al hidrógeno favorece geometrías elípticas más esbeltas.

### ABSTRACT

The pearlitic steels subjected to *hydrogen-assisted fracture* (HAF) atmospheres show a typical fractography called *tearing topography surface* (TTS) which is linked with the hydrogen diffusion into the material. The size and the geometry of the hydrogen affected zones directly influence the fracture behaviour of pearlitic steels subjected to hydrogen atmospheres; therefore this event is a very important aspect on Fracture Mechanics. This article is based on the hydrogen exposure time influence in the aspect of the geometry of these TTS zones. Furthermore, assuming that this geometry is similar to an ellipse, the evolution of the axes of this geometry with the crosshead speed has been quantified, showing that the hydrogen exposure time promotes more slender elliptic geometries.

**PALABRAS CLAVE:** Velocidad de sollicitación, hidrógeno, TTS

### 1. INTRODUCCIÓN

El efecto perjudicial del *hidrógeno* sobre los aceros es un tema de creciente interés tecnológico en cuanto que este elemento químico puede alterar relevantemente las propiedades mecánicas de dichos materiales [1,2] y, como consecuencia, la integridad de los elementos estructurales construidos con ellos, conduciendo, en algunos casos, a roturas catastróficas [3,4]. El hidrógeno actúa penetrando desde el ambiente hacia el interior del material, acumulándose con el tiempo en posibles puntos de fractura hasta alcanzar en uno de ellos el valor de concentración crítica, instante en el cual tiene lugar la fractura [5].

Un material ampliamente utilizado en el ámbito estructural por sus propiedades mecánicas es el *acero perlítico*. Se conoce que este acero al estar sometido a ambientes de *fisuración asistida por hidrógeno* (FAH)

presenta una fractografía típica denominada en inglés *tearing topography surface* (TTS) que está vinculada a la difusión del hidrógeno en el interior del material [6]. Existen estudios previos que ya han explorado exhaustivamente las diferentes etapas de formación de la TTS a nivel fractográfico en aceros perlíticos [7], pero no se ha encontrado ningún trabajo que indique si existe o no una evolución de la geometría de las zonas que presentan esta fractografía con el tiempo de exposición al elemento que lo causa, el hidrógeno.

La diferencia geométrica de estas zonas puede ocasionar diferentes valores del *factor de intensidad de tensiones crítico* en ambiente agresivo de FAH [8], influyendo directamente en el comportamiento en fractura de los aceros perlíticos, por lo que estudiar las diferentes geometrías adoptadas por las zonas TTS supone un

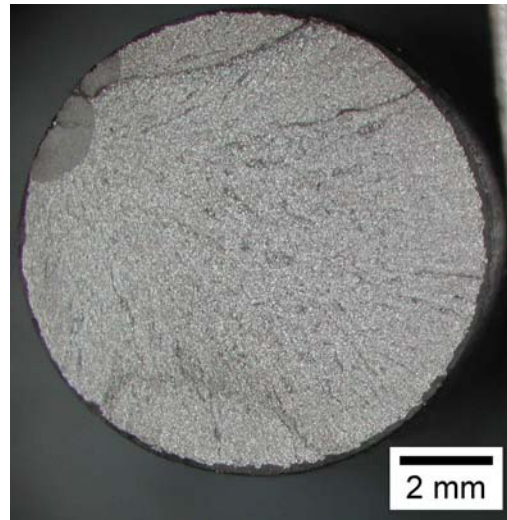
importante aspecto a estudiar desde el punto de vista de la Mecánica de Fractura. El presente trabajo se ha basado en la influencia que ejerce en el aspecto geométrico de estas zonas TTS el tiempo de exposición del acero al hidrógeno considerando, a partir de estudios previos, la apariencia prácticamente elíptica que adoptan dichas zonas [9].

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

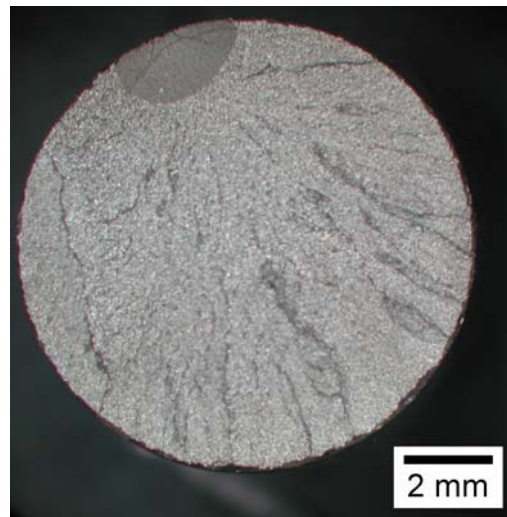
Para realizar el presente estudio se ha utilizado como material un *alambre perlítico* (0.789% C, 0.681% Mn, 0.21% Si, 0.010% P, 0.008% S, 0.005% Al, 0.218% Cr y 0.061% V). Se han realizado ensayos de tracción simple hasta rotura en ambiente catódico de FAH con alambres de 12 mm de diámetro del citado material. Las probetas ensayadas tuvieron una longitud de 300 mm, ya que ésta es la longitud más apropiada para la geometría de alambres según estudios previos [10]. La ejecución de éstos se llevó a cabo a diferentes velocidades de sollicitación (velocidad 1: 0.005 mm/min, velocidad 2: 0.01 mm/min y velocidad 3: 0.1 mm/min), de tal manera que el tiempo de exposición al hidrógeno de las probetas es diferente en cada caso. Para cada una de estas velocidades se realizaron al menos tres ensayos de tal manera que los datos utilizados para este artículo suponen el valor medio de éstos.

El ambiente catódico se simuló con una celda electroquímica en la que se introdujo una disolución saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  con 0.1 g/l de NaCl (pH 12.5), estando a su vez conectada a un potencióstato que mantuvo un potencial de -1200 mV ECS durante la ejecución de los ensayos. El potencial electroquímico que se ha elegido para la realización de este trabajo queda justificado en estudios previos realizados con materiales muy parecidos a los estudiados aquí [11-13]. En éstos se manifiesta que el valor de -1200 mV con respecto al electrodo de calomelanos saturado (ECS) junto al pH de 12.5 aporta unas condiciones electroquímicas que favorecen el fenómeno de fragilización por hidrógeno en los aceros eutectoides o perlíticos.

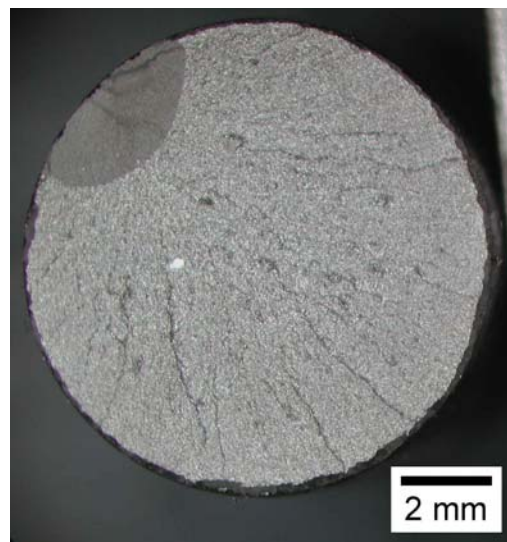
En la Figura 1 se muestran varias superficies de fractura obtenidas después de los ensayos, una representativa de cada velocidad de sollicitación. Se puede comprobar que la superficie de fractura está situada en un solo plano, transversal al eje del alambre y por lo tanto al de sollicitación. Este hecho denota un comportamiento en fractura isótropo y una superficie con apariencia lisa a escala macroscópica [14]. La zona oscura parece ser la zona de proceso de fractura, i.e., la zona donde se debió iniciar la fractura de manera subcrítica hasta alcanzar la situación crítica de tensión y concentración de hidrógeno, momento en el cual la propagación de la fractura provoca la rotura total de la probeta. Según estudios previos esta zona está asociada a la presencia de hidrógeno y la topografía que la define es la conocida como TTS [2,7].



(a)



(b)



(c)

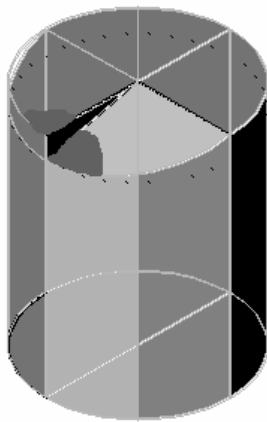
Figura 1. Superficies de fractura obtenidas con diferentes velocidades de sollicitación: a) 0.1 mm/min, b) 0.01 mm/min y c) 0.005 mm/min.

Se puede observar que el tamaño y forma de estas zonas TTS no es constante, diferenciándose en función de la velocidad de sollicitación, o lo que esto implica en realidad: el *tiempo de exposición al hidrógeno*. Para las velocidades más rápidas (menor inferior tiempo de exposición al hidrógeno) se ha encontrado un tamaño de la zona TTS inferior, e incluso se ha observado en todos los ensayos que aparecen varias zonas TTS muy próximas entre sí. Por el contrario, a menores velocidades (0.01 mm/min y 0.005 mm/min) se ha encontrado una única zona TTS en la superficie de fractura, siendo ésta mayor a medida que la velocidad de sollicitación disminuye.

Esto parece indicar que inicialmente se producen varias zonas TTS muy próximas entre sí y, si el tiempo de exposición al hidrógeno es suficiente (velocidades de sollicitación lentas), éstas llegan a *coalescer* dando lugar a una única zona TTS que va aumentando su tamaño mientras el material se mantenga expuesto al hidrógeno. Además, se ha apreciado que las dos zonas TTS que tienden a coalescer se pueden encontrar situadas en distintos planos (Figura 2), lo cual indica que debió existir una entrada de hidrógeno a distintas alturas provocando diferentes *planos de fisuración*, hecho que ya ha sido observado en muestras entalladas de acero perlítico en condiciones de FAH [15].



(a)



(b)

Figura 2. Planos de fisuración a distintas alturas dentro de la superficie de fractura: a) fotografía, b) esquema.

### 3. ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO CUANTITATIVO

Para analizar cómo varía el tamaño del área ocupada por la fractografía TTS ( $A_{TTS}$ ) en función del tiempo de exposición al hidrógeno, se ha cuantificado el valor de esta superficie con un programa de análisis de imagen. En la Figura 3 se puede estimar que la fractografía TTS abarca un mayor porcentaje del área total de la superficie de fractura ( $A_T$ ) a medida que la velocidad de sollicitación es menor, i.e., a medida que el tiempo de exposición al hidrógeno es mayor, lo cual parece lógico desde que esta fractografía está vinculada a la difusión del hidrógeno en el interior del material [6].

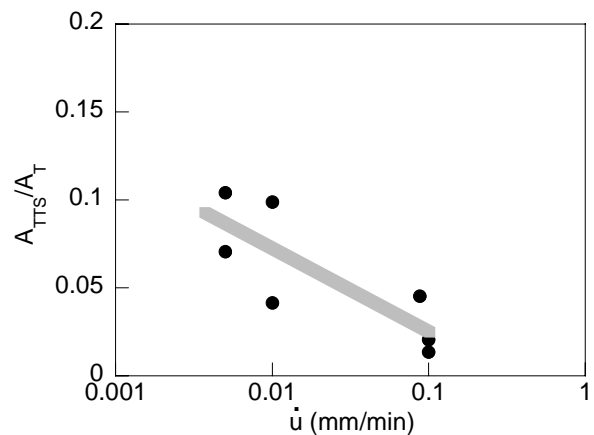


Figura 3. Gráfica comparativa del área ocupada por la superficie TTS en función de la velocidad de sollicitación.

Por otro lado, otro parámetro interesante a cuantificar desde el punto de vista de la Mecánica de Fractura, debido que estas zonas TTS crecen desde la superficie de la probeta hacia el interior de ésta (Figura 1), es la profundidad máxima que llegan a alcanzar en el instante de rotura. De esta manera en la Figura 4 se ha representado la evolución del valor de la profundidad máxima de la zona TTS ( $a$ ), adimensionalizada respecto al diámetro de la probeta ( $D$ ), en función de la velocidad de sollicitación  $\dot{u}$ , lo que viene a ser lo mismo, el tiempo de exposición al hidrógeno.

Tal como era de esperar, el resultado indica que a medida que aumenta la velocidad de sollicitación, y por lo tanto disminuye el tiempo de exposición al hidrógeno, la profundidad de la zona TTS disminuye. Esto concuerda con el gráfico de la Figura 3, en el que el porcentaje de superficie dañada también disminuye a velocidades más rápidas. Esto es así porque a medida que la velocidad de sollicitación es más lenta el hidrógeno tiene más tiempo para introducirse hacia el interior de la probeta y avanzar hacia una zona más profunda, i.e., el hidrógeno, a velocidades lentas, no sólo abarca mayor porcentaje del perímetro de la superficie de la probeta sino que también profundiza más hacia el interior.

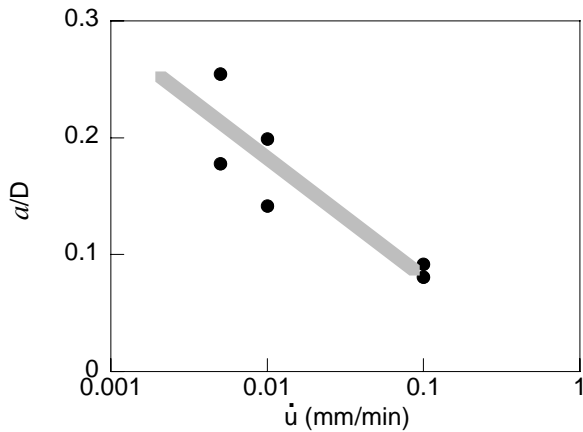


Figura 4. Gráfica comparativa de la variación de la profundidad de la superficie TTS en función de la velocidad de sollicitación.

Las zonas afectadas por el hidrógeno tienden a adoptar una forma semejante a la de una elipse (Figura 5). Por ello, el parámetro obtenido a partir del cociente entre el semieje menor de esta geometría, que viene representado por el valor de la profundidad máxima ( $a$ ), y el semieje mayor ( $b$ ), supone un factor indicativo de la esbeltez de la geometría elíptica. Además, respecto a la importancia de este cociente en la Mecánica de la Fractura existen fórmulas predefinidas que incluyen el parámetro  $a/b$  (factor de aspecto) para calcular el factor de intensidad de tensiones de alambres con prefisuras que se asemejan a la geometría elíptica [16].

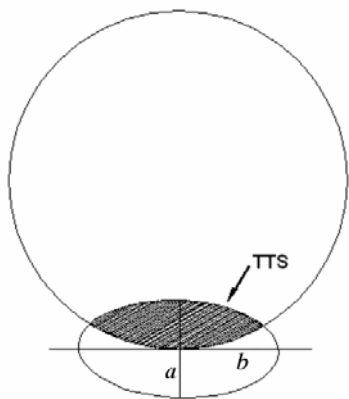


Figura 5. Geometría elíptica adoptada por las superficies afectadas por el hidrógeno (zonas TTS).

En la gráfica de la Figura 6 se representa la evolución del cociente  $a/b$  en función de la velocidad de sollicitación. En este caso se advierte que, aun sin existir una tendencia clara de los puntos representados, se señala un ligero ascenso del cociente  $a/b$  a medida que la velocidad de sollicitación es más elevada. Esto parece indicar que a medida que el tiempo de exposición al hidrógeno es mayor el área afectada directamente por este elemento (zona TTS) tiende a una geometría elíptica más esbelta, i.e., con menor valor del cociente  $a/b$ . En la Figura 7 se ha esbozado un esquema aclaratorio de esta evolución.

A partir de las Figuras 1 y 6 se puede deducir que a altas velocidades de sollicitación (0.1 mm/min) el hidrógeno produce varias zonas TTS de un tamaño pequeño y una geometría cuasi-esférica. A medida que la velocidad de sollicitación disminuye, y por lo tanto el tiempo de exposición al hidrógeno aumenta, la superficie con la topografía TTS abarca una única zona pero con una superficie mayor, adoptando una geometría más elíptica, fruto en algunos casos de la coalescencia de varias zonas TTS más pequeñas y próximas entre sí.

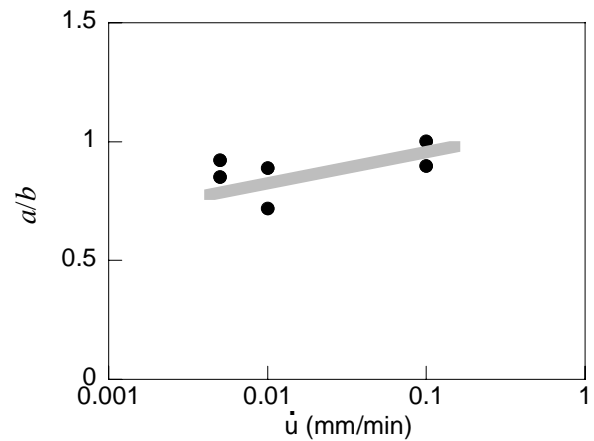


Figura 6. Gráfica comparativa del cociente  $a/b$ , parámetro indicativo del aspecto geométrico de la zona TTS, en función de la velocidad de sollicitación.

En el caso de los ensayos realizados a velocidades de sollicitación altas, 0.1 mm/min, se vieron, tal como se ha comentado previamente, varias zonas afectadas por el hidrógeno, i.e., zonas con fractografía TTS. Dentro de éstas, las medidas obtenidas del cociente  $a/b$  están más próximas a la unidad (geometría circular) en los casos en los que la zona TTS era menor. Este hecho refuerza la suposición de que a medida que penetra más cantidad de hidrógeno en el acero la forma de la zona TTS adquiere una geometría más elíptica (Figura 7).

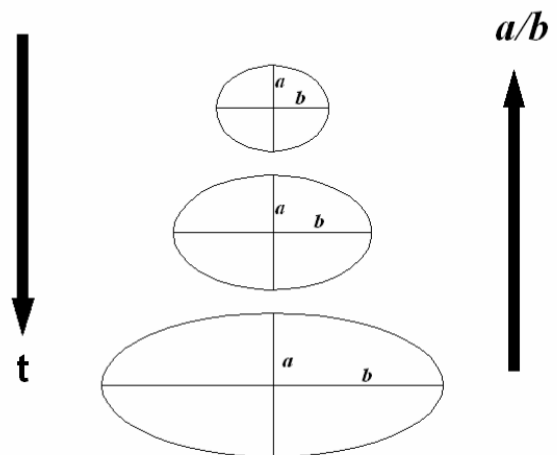


Figura 7. Esquema de la evolución seguida por la superficie TTS con el tiempo hasta rotura ( $t$ ).



#### 4. CONCLUSIONES

- En el alambroón, acero perlítico sin trefilar, la geometría de la zona afectada por el hidrógeno (zona TTS) se ve condicionada por el tiempo de exposición al hidrógeno durante el ensayo.
- En la primera etapa de formación la zona TTS adopta una geometría cercana al semicírculo y, si hay tiempo suficiente para difundirse más hidrógeno, esa geometría tiende a ser cada vez más elíptica.
- A tiempos de exposición al hidrogeno bajos pueden aparecer varias zonas TTS semicirculares situadas muy próximas entre sí, aunque sólo una de ellas alcanza el estado crítico de concentración de hidrógeno vs. tensión, siendo ésta la responsable de la rotura final de la probeta.
- Si estas zonas TTS próximas entre sí pudieran seguir creciendo durante un mayor tiempo de ensayo (velocidad de sollicitación inferior), tenderían a *coalescer* entre ellas, dando como resultado una geometría elíptica muy esbelta.
- A nivel macroscópico también se pueden distinguir distintos *planos de fisuración* dentro de una misma superficie de fractura, consecuencia directa de que el hidrógeno haya penetrado hacia el interior de la probeta a distintas alturas.

#### AGRADECIMIENTOS

La investigación fue realizada con la ayuda del Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto MCYT-FEDER MAT2002-01831), Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto BIA2005-08965), Junta de Castilla y León (Proyectos SA067A05 y SA111A07), Universidad de Salamanca (Proyecto USAL 2005-09) y Fundación “Memoria de D. Samuel Solórzano Barruso”. Además, los autores desean expresar su gratitud a la factoría TREFILERÍAS QUIJANO (Cantabria) por el suministro de acero utilizado en el programa experimental.

#### REFERENCIAS

- [1] Beloglazov, S.M., Peculiarity of hydrogen distribution in steel by cathodic charging. *Journal of Alloys and Compounds*, 2003, **356-357**, 240-243.
- [2] Wayne, G., Corrosion and embrittlement of high-strength steel bridge wires. Ph. D. Thesis, Columbia University, 2001.
- [3] Vehovar, L., Kuhar, V., Vehovar, A., Hydrogen-assisted stress-corrosion of prestressing wires in a motorway viaduct. *Engineering Failure Analysis*, 1998, **5**, 21-27.
- [4] Woodtli, J., Kieselbach, R., Damage due to hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking. *Engineering Failure Analysis*, 2000, **7**, 427-450.
- [5] Toribio, J., Kharin, V., Vergara, D., Blanco, J.A., Ballesteros, J.G. Influence of residual stresses and strains generated by cold drawing on hydrogen embrittlement of prestressing steels. *Corrosion Science*, 2007, **49**, 3557-3569.
- [6] Toribio, J., Lancha, A.M., Elices, M., Characteristics of the new tearing topography surface. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1991, **25**, 2239-2244.
- [7] Toribio, J., Vasseur, E., Hydrogen-assisted micro-damage evolution in pearlitic steel. *Journal of Materials Science Letters*, 1997, **16**, 1345-1348.
- [8] Toribio, J., Ayaso, F.J., González, B., Matos, J.C., Vergara, D., Estimación ingenieril del factor de intensidad de tensiones crítico en alambres fisurados. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 2002, **19**, 501-506.
- [9] Toribio, J., Fracture mechanics approach to hydrogen-assisted microdamage in eutectoid steel. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1997, **28A**, 191-197.
- [10] Toribio, J., On the intrinsic character of the stress-strain curve of a prestressing steel. *Journal of Testing and Evaluation*, 1992, **20**, 357-362.
- [11] Lancha, A. M., Influencia del trefilado en la corrosión bajo tensión de aceros eutectoides. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid. 1987.
- [12] Ovejero, E., Fractura en ambiente agresivo de aceros perlíticos con distinto grado de trefilado. Tesis Doctoral, Universidad de A Coruña, 1998.
- [13] Parkins, R. N., Elices, M., Sánchez Gálvez, V., Caballero, L., Environment sensitive cracking of pre-stressing steels. *Corrosion Science*, 1982, **22**, 379-405.
- [14] Ayaso, J., González, B., Matos, J.C., Vergara, D., Lorenzo, M., Toribio, J., Análisis fractográfico cuantitativo del comportamiento en fractura de aceros perlíticos progresivamente trefilados. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 2005, **22**, 128-233.
- [15] Vergara, D., Fragilización por hidrógeno de aceros de pretensado sometidos a estados triaxiales de tensión. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca, 2007.

- [16] Álvarez, N., González, B., Matos, J.C., Toribio, J., Factores de intensidad de tensiones y propagación de fisuras por fatiga en geometrías cilíndricas. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 2006, **1**, 333-338.