

ESTIMACION ANALITICA DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION LOCAL EN EL EXTREMO DE UNA FISURA

J. Toribio

Departamento de Construcciones Navales, Universidad de La Coruña
E.T.S.I. Caminos, Pol. de Sabón, Parc. 12-14, 15141 Arteixo, La Coruña

Resumen.- Se propone un método simple para estimar analíticamente la velocidad de deformación local en el extremo de una fisura, a partir de la distribución elástica de desplazamientos en el fondo de una grieta en tensión plana. La otra variable relevante en fractura en ambiente de hidrógeno es la profundidad del punto de máxima tensión hidrostática, que se obtiene a partir de distribuciones aproximadas de tensión en las proximidades de una fisura en régimen elasto-plástico, o por medio de estimación experimental a partir de la profundidad asintótica (para ensayos cuasi-estáticos) de la zona afectada por el hidrógeno. El cálculo se contrasta experimentalmente aplicando un criterio cinemático de fractura en ambiente de hidrógeno propuesto con anterioridad.

Abstract.- In this paper a simple procedure is proposed to estimate the local strain rate at a crack tip, on the basis of the elastic displacement distribution in the vicinity of the crack tip in conditions of plain strain. The other relevant variable in hydrogen assisted cracking is the depth of the maximum hydrostatic stress point, which is obtained by using approximate stress distributions in the vicinity of the crack tip in elastic-plastic regime, or calculated as the asymptotic depth (for quasi-static tests) of the hydrogen affected area. The calculation is experimentally checked by applying a kinematic fracture criterion —previously proposed— for high strength steel under hydrogen embrittlement environmental conditions.

1. INTRODUCCION

Es bien conocido que los procesos de fractura en ambientes agresivos dependen fuertemente de variables cinemáticas tales como la velocidad de deformación [1-4], siendo la dependencia no monótona en el caso de disolución anódica, y monótona cuando el proceso es de fragilización por hidrógeno.

Cuando se utilizan muestras pre-fisuradas o entalladas para el estudio experimental de la fractura en medios agresivos, la velocidad de deformación local en las proximidades de la fisura o entalla es la variable que gobierna el proceso, como se ha demostrado con anterioridad mediante la realización de ensayos a velocidad de deformación constante (*Slow Strain Rate Testing*: SSRT) en condiciones de polarización catódica, utilizando muestras entalladas de acero de alta resistencia [5].

El presente artículo aborda el problema de la estimación analítica de la velocidad de deformación local en el extremo de una fisura sometida a un proceso de sollicitación bajo carga creciente. Dicha estimación se realiza a través de la formulación de un modelo cinemático de fractura para describir el efecto de la velocidad de sollicitación en los ensayos de fragilización por hidrógeno, expresando el parámetro crítico de fractura del material en función de la velocidad de deformación local en el extremo de la fisura.

2. VELOCIDAD DE DEFORMACION LOCAL EN EL EXTREMO DE UNA FISURA

Para definir el concepto de velocidad de deformación local en el extremo de una fisura, directamente aplicable a los ensayos a velocidad de sollicitación constante

(SSRT) sobre nuestras fisuradas, la geometría de referencia será un cilindro recto de base circular con una fisura semielíptica en su superficie, siendo L la longitud de probeta, D el diámetro de la muestra, y a la profundidad de la fisura, medida perpendicularmente a la superficie cilíndrica exterior.

La *deformación local* en el extremo de una fisura ϵ_{CT} se define como aquella asociada a una base de medida o longitud de referencia local L_{CT} (suficientemente pequeña como para garantizar la convergencia del método, aunque mayor que el tamaño de grano del material). La base de medida local estará situada en el extremo de la fisura o en su vecindad, y paralela a el eje de la probeta, representado por la coordenada axial z , es decir:

$$\epsilon_{CT} = \frac{\Delta L_{CT}}{L_{CT}} = \frac{u_{CT}}{z_{CT}} \quad (1)$$

donde el alargamiento ΔL_{CT} de la base de medida local es el doble del desplazamiento entre sus extremos (desplazamiento local u_{CT}) y la longitud de referencia local L_{CT} es el doble de la coordenada axial de sus extremos (z_{CT}). La definición (1) incluye la hipótesis de pequeñas deformaciones, que se utilizará en este trabajo, y es normalmente válida para acero de alta resistencia (u otro material con similar comportamiento frágil) en condiciones de fisuración en ambiente agresivo. El centro de la base de medida local L_{CT} estará siempre en el plano de la fisura, aunque podrá situarse a distancia variable (siempre pequeña) respecto del fondo de la grieta, que es su ubicación más representativa.

La *velocidad de deformación local* en el extremo de la fisura puede obtenerse por derivación numérica de la expresión (1):

$$\dot{\epsilon}_{CT} = \frac{u_{CT}^{i+1} - u_{CT}^i}{z_{CT} \Delta t} \quad (2)$$

donde los superíndices i e $i+1$ indican un escalón de carga y el inmediatamente siguiente. El valor Δt representa el intervalo temporal entre dos escalones de carga, que puede ser constante o variable a lo largo del proceso de carga. En cualquier caso, y a efectos de cálculo, Δt debe tomarse suficientemente pequeño para que tenga sentido la derivada calculada incrementalmente.

3. ESTIMACION DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACION LOCAL

Como se ha demostrado con anterioridad [5], el promedio espacio-temporal de la velocidad de deformación local resulta representativo en el caso de ensayos de fragilización en los que el hidrógeno es

introducido mediante polarización catódica realizada durante el proceso mecánico de carga.

Dicho valor medio puede definirse mediante una integración tanto espacial como temporal, de la forma siguiente:

$$\langle\langle \dot{\epsilon}_{CT} \rangle\rangle = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \langle \dot{\epsilon}_{CT} \rangle dt \quad (3)$$

donde t_c es el tiempo hasta rotura y $\langle \dot{\epsilon}_{CT} \rangle$ es el promedio espacial de la velocidad de deformación local en las proximidades del extremo de la fisura (calculado sobre la zona afectada por el hidrógeno). La expresión (3) puede aproximarse mediante:

$$\langle\langle \dot{\epsilon}_{CT} \rangle\rangle = \frac{\langle \epsilon_{CT,C} \rangle}{t_c} \quad (4)$$

siendo $\langle \epsilon_{CT,C} \rangle$ el promedio espacial de la deformación crítica en el entorno del extremo de la fisura, que puede calcularse aproximadamente como la deformación crítica en el punto medio de la región crítica o zona afectada por el hidrógeno (distancia r_c al extremo de la fisura):

$$\langle\langle \dot{\epsilon}_{CT} \rangle\rangle = \frac{\epsilon_{CT,C}(r_c)}{t_c} \quad (5)$$

Considerando la definición de deformación local (1) y situando la base de medida local L_{CT} precisamente a distancia r_c respecto al extremo de la fisura:

$$\epsilon_{CT,C}(r_c) = \frac{u_{CT,C}}{r_c \operatorname{tg} \theta} \quad (6)$$

donde u_{CT} es el desplazamiento de la base de medida local, r y θ son las coordenadas polares locales en el extremo de la fisura (distancia y ángulo), y el subíndice c indica la situación crítica o de fractura en los ensayos de fragilización por hidrógeno. Asumiendo como válidas las hipótesis de la Mecánica de Fractura Elástico-Lineal (MFEL) en condiciones de deformación plana [6], se tiene:

$$\epsilon_{CT,C}(r_c) = \frac{K_C}{G} \sqrt{\frac{1}{2\pi r_c}} \xi(\theta) \quad (7)$$

donde K_C es el factor de intensidad de tensiones crítico (al final del ensayo de fragilización por hidrógeno), $G = E/2/(1+\nu)$, E y ν son las constantes elásticas del material, y $\xi(\theta)$ es una función adimensional de la coordenada angular θ , dada por [6]:

$$\xi(\theta) = \frac{\operatorname{sen}(\theta/2)}{\operatorname{tg} \theta} [2 - 2\nu - \cos^2(\theta/2)] \quad (8)$$

4. APLICACION A ENSAYOS CON VELOCIDAD DE DEFORMACION CONSTANTE

El concepto de velocidad de deformación local en el extremo de una fisura se aplicó a la modelización de ensayos a velocidad de deformación constante (SSRT) en condiciones de fragilización por hidrógeno, sobre muestras prefisuradas a partir de barras de 12mm de acero perlítico de alta resistencia, cuya composición química y propiedades mecánicas se dan en las Tablas 1 y 2, respectivamente.

Tabla 1. Composición química del acero

C	Mn	Si	P	S
0.74	0.70	0.20	0.016	0.023

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero

E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_{max} (MPa)	ϵ (σ_{max}) (%)
195	725	1300	8.0

Las muestras fueron pre-fisuradas transversalmente en aire con un valor máximo del factor de intensidad de tensiones durante la última etapa de $0.28 K_{IC}$, donde K_{IC} es la tenacidad de fractura, que para el acero en estudio era $53 \text{ MPam}^{1/2}$. La longitud de fisura fue $a = 4.0 \pm 0.2 \text{ mm}$ en todos los casos. La velocidad de sollicitación cubrió un amplio intervalo desde 10^{-9} hasta 10^{-5} ms^{-1} . El ambiente agresivo fue una solución $1 \text{ g/l Ca(OH)}_2 + 0.1 \text{ g/l NaCl}$ ($\text{pH} = 12.5$). El potencial electro-químico se mantuvo constante en el valor $E = -1200 \text{ mV ECS}$ (catódico).

La Fig. 1 muestra los resultados macroscópicos de los ensayos de fragilización por hidrógeno, expresados como una relación entre la carga de fractura en ambiente de hidrógeno F_C (dividida por la carga de fractura en aire F_O) en función de la velocidad de sollicitación, mostrando la típica tendencia monótona creciente: a mayor velocidad de sollicitación, mayor carga de fractura y menor efecto fragilizador. Para valores muy bajos de la velocidad de sollicitación, se alcanza la solución estacionaria para el problema de la difusión de hidrógeno, y el efecto fragilizador no depende de la velocidad. El análisis fractográfico mostró la bien

conocida zona TTS o *Tearing Topography Surface* [7,8], región afectada por el hidrógeno.

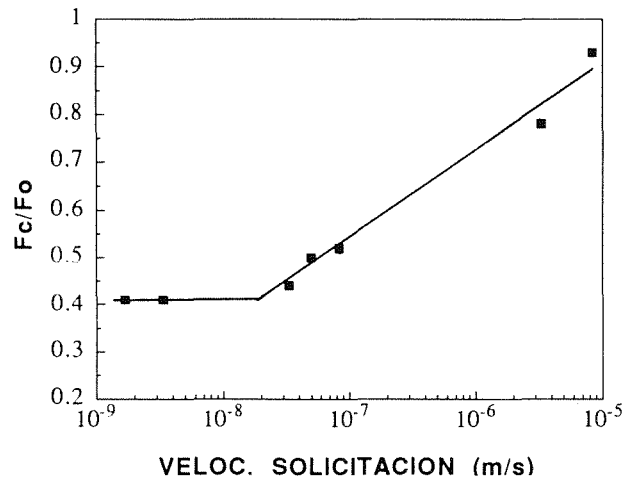


Fig. 1. Resultados experimentales de los ensayos de fragilización por hidrógeno sobre nuestras pre-fisuradas: Cociente entre la carga de fractura en hidrógeno (F_C) y la misma en aire (F_O) en función de la velocidad de sollicitación.

Con el fin de modelizar adecuadamente el fenómeno, resulta útil expresar los resultados en forma adimensional. Para describir el efecto fragilizador se utilizará la siguiente variable adimensional:

$$\sigma^* = \frac{F_C}{F_O} = \frac{K_C}{K_{IC}} = \frac{\bar{\sigma}_C}{\bar{\sigma}_O} \tag{9}$$

donde σ^* es la misma variable que la representada en el eje vertical de la Fig. 1, es decir, el cociente entre la carga de rotura en ambiente agresivo (F_C) y la misma en aire (F_O), que bajo las hipótesis de la MFEL es exactamente la relación entre el factor de intensidad de tensiones crítico en el ensayo de fragilización (K_C) y la tenacidad de fractura en aire (K_{IC}), y representa así el cociente entre la tensión equivalente crítica en ambiente de hidrógeno ($\bar{\sigma}_C$) y la misma variable en aire ($\bar{\sigma}_O$), medidas ambas en la región afectada por el hidrógeno, y supuesta ésta siempre contenida en la zona de dominio de K .

Para representar el efecto de la velocidad de deformación se define la siguiente variable adimensional:

$$\epsilon^* = \langle \dot{\epsilon}_{CT} \rangle \frac{x_s^2}{D^*} \tag{10}$$

donde $\langle \dot{\epsilon}_{CT} \rangle$ es el promedio espacio-temporal de la velocidad de deformación local en las proximidades del

extremo de la fisura (promedio espacial sobre la zona afectada por el hidrógeno; promedio temporal a lo largo de la duración del ensayo), x_S la profundidad del punto de máxima tensión hidrostática (hacia la cual el hidrógeno se difunde), y D^* el coeficiente de difusión de hidrógeno en acero perlítico.

Sustituyendo las expresiones (5) y (7) en (10), y considerando la zona TTS como zona crítica ($r_C = x_{TTS}/2$), se tiene:

$$\varepsilon^* = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{K_{IC}}{G D^*} x_S^2 \xi \frac{\sigma^*}{t_C \sqrt{x_{TTS}}} \quad (11)$$

con los significados ya definidos, y ξ dada en la expresión (8). El primer factor ($K_{IC}/G D^*$), representa propiedades del material; el segundo ($x_S^2 \xi$), características geométricas; y el tercero ($\sigma^*/t_C (x_{TTS})^{1/2}$), resultados experimentales.

Se utilizaron los siguientes valores de cálculo:

$$\begin{aligned} K_{IC} &= 53 \text{ MPa m}^{1/2} \\ G &= 73.3 \text{ GPa} \\ D^* &= 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s} \\ \xi_C &= 0.1862 \quad (\text{con } \theta = \pi/4) \end{aligned}$$

y los resultados experimentales útiles para la modelización aparecen en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados experimentales de los ensayos de fragilización

Nº	V. Solicitación (m/s)	t_C (s)	F_C/F_0	x_{TTS} (m)
1	8.33×10^{-6}	600	0.93	10^{-6}
2	3.33×10^{-6}	1080	0.78	10^{-6}
3	8.33×10^{-8}	25200	0.52	1.7×10^{-4}
4	5.00×10^{-8}	34800	0.50	1.7×10^{-4}
5	3.33×10^{-8}	42000	0.44	7×10^{-4}
6	3.33×10^{-9}	540000	0.41	7×10^{-4}
7	1.67×10^{-9}	1080000	0.41	7×10^{-4}

El último paso es el cálculo del valor x_S , la profundidad del punto de máxima tensión hidrostática, que no puede calcularse a partir de la MFEL (que predice un valor nulo, con tensión máxima precisamente en el extremo de la fisura), de forma que se estimó a partir de dos aproximaciones elasto-plásticas. La primera consistió en la utilización de una distribución aproximada de tensión en la vecindad del extremo de la fisura, sobre la

base de la *Teoría de Líneas de Deslizamiento*, que conduce a la siguiente expresión [9].

$$\sigma_Y \left[\frac{1}{2} + \ln \left(1 + \frac{x_S}{\rho} \right) \right] = \frac{2}{3} \frac{(1+\nu) K_I}{\sqrt{2\pi x_S}} \quad (12)$$

donde σ_Y es el límite elástico del material y ρ el radio de curvatura en el fondo de la grieta. Por consiguiente:

$$x_S = x_S \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right) \text{ creciente} \quad (13)$$

es decir, la profundidad del punto de máxima tensión hidrostática es función creciente del cociente K_I/σ_Y . Esto implica que dicho valor cambia a lo largo del proceso de carga (fuertemente al principio y suavemente cuando la zona plástica está totalmente desarrollada). Sin embargo, puede adoptarse como valor aproximado el obtenido utilizando la tenacidad de fractura en aire K_{IC} como valor crítico del factor de intensidad de tensiones, lo que corresponde al instante crítico de fractura para el ensayo en aire.

El radio de curvatura ρ puede calcularse como la mitad del COD crítico (asumiendo fondo circular para el extremo de la fisura), y este valor puede relacionarse con el valor crítico de la Integral J (J_{IC}) y la propia tenacidad de fractura:

$$\rho_C = \frac{COD_C}{2} = \frac{1}{2} \frac{J_{IC}}{\sigma_Y} = \frac{1}{2} \frac{K_{IC}^2}{E \sigma_Y} \quad (14)$$

Introduciendo las características del material en (14), se obtiene un valor para el radio de curvatura $\rho_C = 10^{-5} \text{ m}$, y la ecuación (12) da un valor aproximado para la profundidad del punto de máxima tensión hidrostática $x_S = 10^{-4} \text{ m}$.

La segunda aproximación se basa en calcular el valor asintótico (para ensayos cuasi-estáticos) de la zona afectada por el hidrógeno. En muestras entalladas de un acero perlítico similar [10], se ha demostrado que — aparte de los primeros escalones de carga — la profundidad del punto de máxima tensión hidrostática no cambia con el proceso de carga, pudiendo considerarse una característica de la geometría. En ensayos cuasi-estáticos la profundidad TTS alcanza el punto de máxima tensión hidrostática, es decir:

$$\lim_{\dot{\varepsilon} \rightarrow 0} x_{TTS} = \lim_{t_C \rightarrow \infty} x_{TTS} = x_S \quad (15)$$

donde $\dot{\varepsilon}$ es la velocidad de deformación y t_C el tiempo hasta rotura o tiempo crítico.

En muestras pre-fisuradas, el punto de máxima tensión hidrostática sí cambia a lo largo del proceso de carga hasta que se alcanzan estadios muy avanzados de

plastificación). Sin embargo, como primera aproximación, el valor asintótico de la zona TTS en ensayos cuasi-estáticos puede ser utilizado para estimar x_s . Como puede verse en la Tabla 3, este valor es aproximadamente 5×10^{-4} m (la zona TTS siempre sobrepasa algo el punto x_s).

Ambas aproximaciones dan valores de x_s con el mismo orden de magnitud, lo cual confirma su bondad. Adoptando el valor medio ($x_s = 3 \times 10^{-4}$ m), y calculando las variables σ^* (9) y ϵ^* (11) para todos los ensayos, se obtiene la Fig. 2, que muestra los resultados experimentales en forma adimensional, expresados en función de la velocidad de deformación local en las proximidades del extremo de la fisura, promediada a lo largo de la duración de ensayo sobre la zona afectada por el hidrógeno. Los resultados expresados de esta manera no dependen de la geometría, como se ha puesto de manifiesto con anterioridad [5].

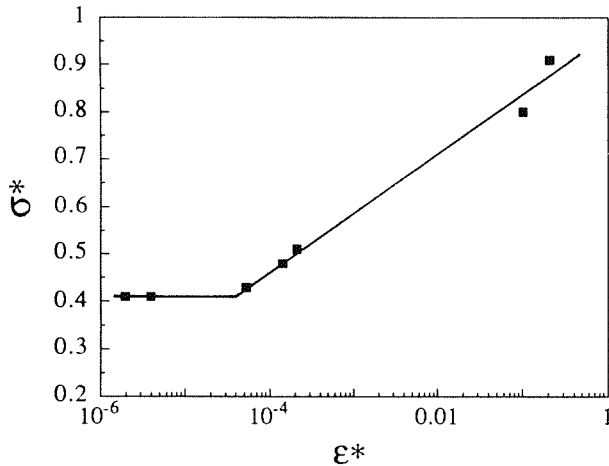


Fig. 2. Resultados de los ensayos en forma adimensional: Tensión de fractura en función de la velocidad de deformación local en el extremo de la fisura.

La Fig. 3 —tomada de la referencia [5] y dibujada en la misma escala que la Fig. 2— da los resultados de los mismos ensayos de fragilización por hidrógeno, realizados sobre probetas entalladas de un acero perlítico similar. Se utilizaron diferentes geometrías entalladas (A, B, C, D) para tener diferentes estados tensionales en las proximidades del fondo de la entalla y diferentes velocidades de deformación local. Los símbolos oscuros y las líneas horizontales discontinuas corresponden a los ensayos cuasi-estáticos, y limitan el intervalo de aplicabilidad de la formulación cinemática del criterio de fractura: Para velocidades superiores a las del ensayo cuasi-estático, la tensión crítica de fractura es función creciente de la velocidad de deformación local.

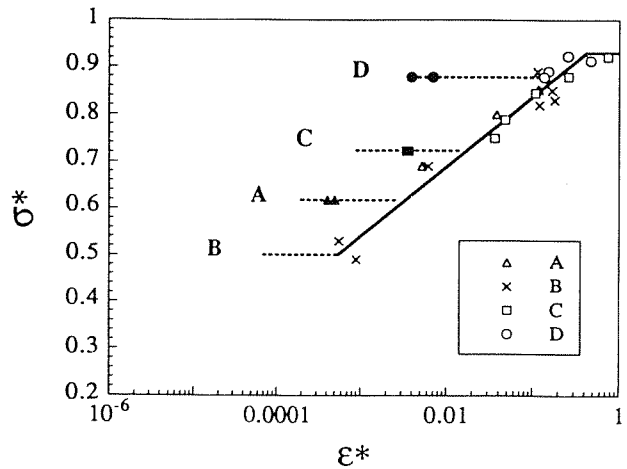


Fig. 3. Resultados de ensayos de fragilización por hidrógeno realizados en muestras entalladas de un acero perlítico similar, con diferentes geometrías de entalla (A, B, C, D). Los símbolos oscuros y las líneas horizontales discontinuas corresponden a los ensayos cuasi-estáticos.

Puede observarse que ambos conjuntos de valores experimentales muestran la misma tendencia cuando se expresan en función de la velocidad de deformación local en las proximidades de la fisura o entalla, lo que confirma el papel relevante de esta variable en los procesos de fractura en ambiente de hidrógeno en presencia de concentraciones de deformación en el fondo del defecto superficial.

Actualmente se trabaja en esta prometedora línea, con el fin de ensayar muestras entalladas exactamente del mismo acero que el utilizado en los ejemplares pre-fisurados presentados en este artículo, bajo las mismas condiciones ambientales. En el plano teórico, las futuras direcciones de trabajo pueden centrarse en el uso de expresiones más precisas de la distribución de tensiones en las proximidades del extremo de una fisura en régimen elasto-plástico, así como en la obtención numérica de dichas distribuciones de tensión.

5. CONCLUSIONES

1. Se ha propuesto un método simple para estimar la velocidad de deformación local en las proximidades del extremo de una fisura a partir de la distribución elástica de desplazamientos en el fondo de una grieta en tensión plana.
2. El procedimiento es totalmente analítico, gozando así de claras ventajas de simplicidad y economía de cálculo frente a los métodos numéricos tradicionales.

3. Los valores estimados de la velocidad de deformación local se han aplicado a la modelización del fenómeno de fragilización por hidrógeno de muestras fisuradas sometidas a ensayos a velocidad de deformación constante (SSRT).
4. Los resultados del modelo concuerdan realmente bien con resultados previos obtenidos en probetas entalladas de un acero similar bajo las mismas condiciones de fragilización por hidrógeno.
5. Estos resultados confirman el importante papel que juega la velocidad de deformación local en el extremo de una fisura en procesos de fragilización por hidrógeno en presencia de concentraciones de deformación.

Agradecimientos

El autor desea expresar su agradecimiento al Prof. Manuel Elices, Director del Departamento de Ciencia de Materiales de la Universidad Politécnica de Madrid, por su ideas y comentarios. Igualmente agradece a la Dra. A.M. Lancha (CIEMAT) la obtención de los resultados experimentales utilizados en la contrastación del modelo.

REFERENCIAS

- [1] Ford, F.P., y Silverman, M., "Effect of loading rate on environmentally controlled cracking of sensitized 304 stainless steel in high purity water", *Corrosion* **36**, 597-603 (1980).
- [2] Hinton, B.R.W., y Procter, R.P.M., "The effect of strain-rate and cathodic potential on the tensile ductility of X-65 pipeline steel", *Corrosion Science* **23**, 101-123 (1983).
- [3] Abramson, G., Evans, J.T., y Parkins, R.N., "Investigation of stress corrosion crack growth in Mg alloys using J-integral estimations", *Metallurgical Transactions* **16A**, 101-108 (1985).
- [4] Magnin, T., Chieragatti, R., y Oltra, R., "Mechanism of brittle fracture in a ductile 316 alloy during stress corrosion", *Acta Metallurgica et Materialia* **38**, 1313-1319 (1990).
- [5] Toribio, J., y Elices, M., "Importancia de la velocidad de deformación local en la fractura en ambientes agresivos", *Anales de Mecánica de la Fractura* **6**, 39-44 (1989).
- [6] Broek, D., "Elementary Engineering Fracture Mechanics". Martinus Nijhoff, The Hague (1982).
- [7] Toribio, J., Lancha, A.M., y Elices, M., "Characteristics of the new Tearing Topography Surface", *Scripta Metallurgica et Materialia* **25**, 2239-2244 (1991).
- [8] Toribio, J., Lancha, A.M., y Elices, M., "La topografía T.T.S. como zona asociada a fenómenos de fragilización por hidrógeno", *Anales de Mecánica de la Fractura* **7**, 170-177 (1990).
- [9] Doig, P., y Jones, G.T., "A model for initiation of hydrogen embrittlement cracking at notches in gaseous hydrogen environments", *Metallurgical Transactions* **8A**, 1993-1998 (1977).
- [10] Toribio, J., Lancha, A.M., y Elices, M., "Macroscopic variables governing the microscopic fracture of pearlitic steels", *Materials Science and Engineering* **A145**, 167-177 (1991).