

PLANTEAMIENTO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LA FISURACIÓN ASISTIDA POR EL AMBIENTE DEL ACERO X80 BASADA EN LA TEORÍA DE DISTANCIAS CRÍTICAS

P. González^{1*}, S. Cicero¹, J.A. Álvarez¹, B. Arroyo¹

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales.
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.
Avda. De los Castros 44, 39005, Santander, España.

*Persona de contacto: glezpablo@unican.es

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de la fisuración asistida por ambiente empleando la Teoría de las Distancias Críticas (TDC). La investigación se desarrolla a través de un programa experimental compuesto de probetas C(T) de fractura con diferentes radios de entalla, desde 0 mm (defecto tipo fisura) hasta 2 mm. El material utilizado es un acero X80 utilizado en tuberías de transporte de gas a bajas temperaturas que ha sido estudiado en condiciones de Fragilización por Hidrógeno (FH). El trabajo se completa con simulaciones por Elementos Finitos. En base a los resultados, la capacidad de la TDC para analizar procesos de fisuración asistida por ambiente queda probada en este material y en las condiciones estudiadas.

PALABRAS CLAVE: Fragilización por Hidrógeno; Teoría de las Distancias Críticas; Efecto Entalla; Fisuración Asistida por el Ambiente; Polarización Catódica.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of Environmental Assisted Cracking (EAC) based on the Theory of Critical Distances (TCD). The research is based on an experimental program composed of fracture specimens with notch radius varying from 0 mm (crack-like defect) up to 2 mm. A pipeline steel was used in this work (X80). It has been analysed under Hydrogen Embrittlement (HE) conditions. The study has been completed with Finite Elements Simulation analysis. The capacity of the TCD to analyse EAC processes has been proven in this material subjected to the mentioned conditions.

KEYWORDS: Hydrogen Embrittlement; Theory of Critical Distances; Notch Effect; Environmental Assisted Cracking; Cathodic Polarization.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía ha favorecido el desarrollo de materiales para el transporte de gas y petróleo mediante tuberías, componentes y estructuras muchas de las cuales se encuentran en zonas offshore. El efecto del ambiente en estos materiales puede provocar fenómenos de Corrosión Bajo Tensión (CBT) y Fragilización por Hidrógeno (FH). Estos fenómenos conducen a la degradación de las propiedades mecánicas de los aceros cuando éstos están en contacto con un ambiente agresivo [1–3].

Los recambios y reparaciones de defectos en componentes offshore conllevan un gran gasto económico [4]. Pero estos defectos no son necesariamente defectos tipo fisura, sino que pueden presentar un radio finito en el frente del defecto, en cuyo caso se denominan entallas. Como ejemplo, se pueden citar los defectos por corrosión, defectos de fabricación o

defectos creados por daño mecánico. Si las entallas son consideradas como fisuras en las evaluaciones de integridad estructural, los resultados serán demasiado conservadores por el hecho de que los componentes entallados presentan una tenacidad aparente a fractura mayor que la de los componentes fisurados [5–8]. Por este motivo, es necesario implementar metodologías de que consideren el comportamiento real de las entallas.

En la actualidad, muchos investigadores han desarrollado metodologías capaces de predecir el comportamiento a fractura de componentes entallados. Los métodos más relevantes son los basados en el campo de tensiones en el frente del defecto debido a su mayor aplicabilidad. Entre éstos métodos destacan el Método del Punto (MP) y el Método de la Línea (ML), ambos pertenecientes a la Teoría de las Distancias Críticas (TDC) [9–11].

La TDC está formada por un grupo de metodologías, las cuales utilizan un parámetro de longitud característico

del material, la distancia crítica (L), para realizar las evaluaciones a fractura y fatiga. Tiene los orígenes a mediados del siglo XX pero es en las últimas décadas cuando ha alcanzado mayor desarrollo y aceptación [8,12]. La capacidad predictiva de la TDC en el estudio de la fractura y la fatiga ha sido probada por numerosos autores. Sin embargo, esta teoría nunca ha sido utilizada para predecir la rotura en condiciones de CBT o FH.

El principal propósito de este estudio es realizar, a través de una serie de ensayos, un análisis de la fisuración asistida por ambiente basado en la TDC (más concretamente, utilizando el MP). Para ello se ha utilizado un acero comúnmente empleado el transporte de gas natural y petróleo. La fragilización del material proviene de un sistema de protección del metal frente a la corrosión usado frecuentemente: la polarización catódica. Han sido realizados ensayos a fractura en condiciones de FH de probetas C(T) fisuradas y entalladas mediante ensayos de baja velocidad de desplazamiento. Finalmente, se ha empleado un análisis por elementos finitos para determinar el campo tensional en las proximidades del defecto en el momento en el que la fisura empieza a propagar.

LA TEORÍA DE LAS DISTANCIAS CRÍTICAS

La TDC fue propuesta a mediados del siglo XX por Neuber [13,14] y Peterson [15]. Sin embargo, ha sido en las últimas décadas cuando más auge y aceptación ha tenido esta teoría, proporcionando soluciones precisas para diversos problemas de la ingeniería [16–19]. La TDC agrupa un conjunto de metodologías, las cuales tienen en común el uso de un parámetro característico del material, con unidades de longitud, llamado la distancia crítica (L). Este parámetro característico, en los análisis a fractura, sigue la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (1)$$

K_{mat} es la tenacidad a fractura (obtenida de componentes fisurados) y σ_0 es la tensión inherente, que suele ser mayor que la resistencia a tracción del material, σ_U , aunque requiere calibración.

En análisis a fatiga, la ecuación para la distancia crítica sigue una expresión análoga:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma_0} \right)^2 \quad (2)$$

donde ΔK_{th} es el umbral de propagación de fisura y $\Delta \sigma_0$ es la resistencia a fatiga de una probeta lisa.

El método del punto, dentro de la TDC, ha sido empleado para este estudio por su sencillez y precisión a la hora de aplicarlo.

Método del Punto

El método del punto (MP) es la metodología más simple de la TDC. Establece que el fallo tiene lugar cuando se alcanza una tensión igual a la tensión inherente a una distancia $L/2$ desde el frente del defecto (Ecuación (3)):

$$\sigma \left(\frac{L}{2} \right) = \sigma_0 \quad (3)$$

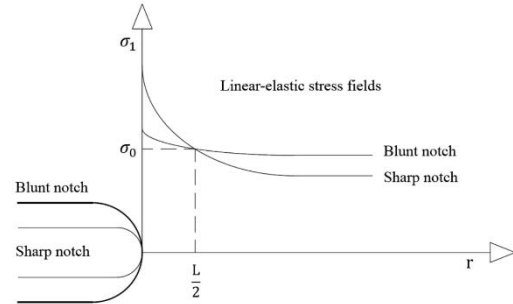


Figura 1. Curvas tensión-distancia al frente del defecto para la obtención de L .

La Figura 1 muestra de manera gráfica una de las posibilidades utilizadas para la obtención de la distancia crítica, L , y de la tensión inherente, σ_0 . Las curvas tensión-distancia al frente del defecto, en fractura, de dos ensayos con diferentes geometrías del defecto, se cortan en un punto de coordenadas $(L/2, \sigma_0)$.

El MP también ofrece una ecuación para predecir la tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) de componentes con entallas tipo U. Para ello ha de combinarse el MP con la ecuación de Creager y Paris (Ecuación (4)) del campo de tensiones elástico lineal en las entallas [20]:

$$\sigma(r) = \frac{K}{\sqrt{\pi}} \frac{2(r + \rho)}{(2r + \rho)^{3/2}} \quad (4)$$

donde K es el factor de intensidad de tensiones (definido por probetas fisuradas), ρ es el radio de entalla y r es la distancia desde el frente del defecto. Nótese que la Ecuación (4) solo es válida para pequeñas distancias desde el frente de entalla. Combinando la ecuación (3) y la ecuación (4) y suponiendo que el fallo tiene lugar cuando K_I es igual a K_{mat}^N , entonces se obtiene la ecuación (5):

$$K_{mat}^N = K_{mat} \frac{\left(1 + \frac{\rho}{L}\right)^{3/2}}{\left(1 + \frac{2\rho}{L}\right)} \quad (5)$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Material

El material empleado en este estudio es el acero API X80, empleado normalmente en el transporte de gas y petróleo a bajas temperaturas debido a sus propiedades mecánicas

y su tenacidad. Presenta una microestructura ferrítico-perlítica, con un tamaño de grano entre 5 μm y 15 μm , como se muestra en la Figura 2. Las propiedades mecánicas vienen representadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero X80.

MATERIAL	E, GPa	σ_Y , MPa	σ_U , MPa
X80	209.9	621.3	692.9

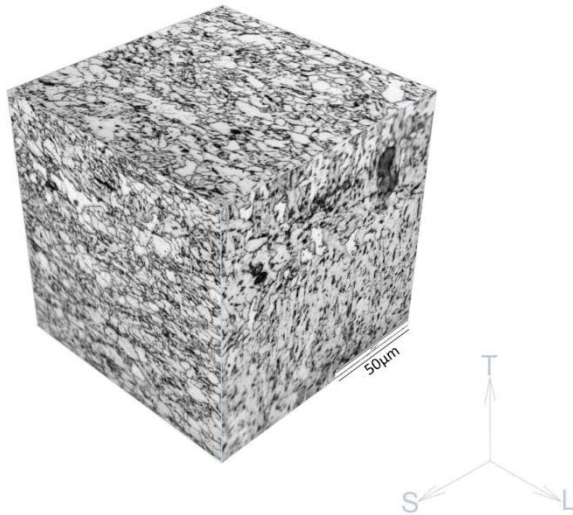


Figura 2. Microestructura del acero X80.

La composición química de acero X80 viene reflejada en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química del acero X80.

C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu
0.07	0.18	<0.005	<0.005	1.83	0.03	-	0.15	0.02
Sn	Al	V	Ti	Co	Nb	B	N	Ceq
-	0.03	-	-	-	0.03	-	<0.005	0.408

Simulación de la Polarización Catódica

En este estudio ha sido empleado un sistema de polarización catódica. El principio de la polarización catódica (o carga catódica) es la aplicación de un potencial (o intensidad de corriente) negativo entre el ánodo y el cátodo para que la velocidad de corrosión descienda [21]. Este método se emplea para proteger contra la corrosión componentes que operan en ambientes agresivos. El principal inconveniente es que causa fragilización en el acero por la acción del hidrógeno, que penetra y queda atrapado en el material.

Como muestra la Figura 3, el acero (ánodo) está conectado, a través de una solución ácida, con el metal noble (platino) que actúa como cátodo. La intensidad de corriente que circula entre ambos es de 5 mA/cm² debido a su uso extendido en la industria.

La disolución ácida empleada ha sido preparada siguiendo el método de Pressouyre [22–24]. Dicha

disolución es, básicamente, una disolución de H₂SO₄ en agua destilada con 10 mg de As₂O₃ y 10 gotas de CS₂ por litro de disolución. El pH ha de permanecer entre 0.65-0.80 siendo necesario el cambio de disolución cuando el pH se encuentra fuera de esos valores. La temperatura de ensayo ha estado comprendida entre 20 °C-25 °C.

Es necesaria una recirculación de la disolución para evitar que las burbujas de hidrógeno que se quedan en la superficie del metal produzcan algún tipo de corrosión localizada, como por ejemplo picaduras.

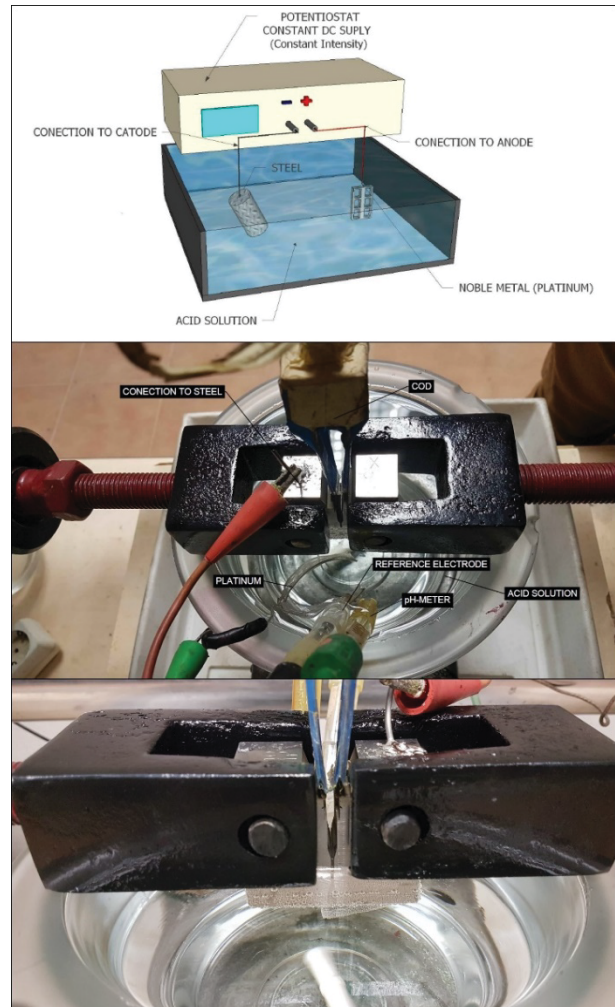


Figura 3. Esquema de la polarización catódica durante los ensayos.

Metodología

El uso de la TDC para análisis a fractura y fatiga es ampliamente conocido. Predice de manera fiable y precisa el fallo en componentes entallados (ej., ecuación (5)). En este estudio se va a reformular el mismo concepto que ofrece la TDC en fractura y fatiga, para abordar la fisuración asistida por ambiente (de ahora en adelante se denotará EAC por sus siglas en inglés). De esta manera, y, análogamente a la ecuación (1) en fractura y a la ecuación (2) en fatiga, la siguiente expresión ha sido propuesta para el cálculo de la distancia crítica en condiciones de EAC:

$$L_{EAC} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IEAC}}{\sigma_{0EAC}} \right)^2 \quad (6)$$

donde L_{EAC} es la distancia crítica del material en condiciones de EAC, K_{IEAC} es umbral de propagación de fisuras y σ_{0EAC} es la tensión inherente en ambiente agresivo. Siguiendo esta ecuación y, aplicando el método del punto, es posible establecer predicciones de componentes entallados en condiciones de EAC como muestra la siguiente ecuación:

$$K_{IEAC}^N = K_{IEAC} \frac{\left(1 + \frac{\rho}{L_{EAC}}\right)^{3/2}}{\left(1 + \frac{2\rho}{L_{EAC}}\right)} \quad (7)$$

A través de la ecuación (7) se pueden realizar predicciones del umbral de propagación (en adelante, umbral de propagación aparente) en EAC, K_{IEAC}^N , de un material con entallas en forma de U, a partir de su umbral de propagación en el ambiente agresivo, K_{IEAC} , el radio de entalla, ρ y la distancia crítica en EAC, L_{EAC} .

Para comprobar la validez de la ecuación (7), es preciso el cálculo de la tenacidad aparente a fractura (componentes entallados) y la tenacidad a fractura (componentes fisurados) en condiciones de EAC, mediante una serie de ensayos a fractura en ambiente agresivo. En estos ensayos, la probeta ha de someterse a una velocidad de desplazamiento constante mientras está expuesta al medio agresivo. La velocidad necesaria para que el ambiente gobierne el comportamiento del material ha de ser muy baja, por lo que los ensayos que se han de realizar son de baja velocidad de desplazamiento [25]. Los ensayos de baja velocidad de desplazamiento han supuesto un avance sustancial a la hora de evaluar el efecto del ambiente en un material, puesto que reducen la duración de los ensayos de caracterización de materiales en ambientes agresivos de manera significativa.

Antes de la realización del ensayo, las probetas han de permanecer sumergidas en el ambiente agresivo y estar sometidas a la polarización catódica durante 48h para lograr la máxima absorción de hidrógeno.

Después de la absorción del hidrógeno, una máquina de eje horizontal de baja velocidad de deformación lleva a cabo los ensayos. La velocidad de desplazamiento utilizada, siguiendo las recomendaciones de la normativa ISO 7539 [25], es de $6 \cdot 10^{-8}$ m/s. El ensayo presenta un registro continuo de Fuerza-COD (*Crack Opening Displacement*). Una vez obtenida la curva, se emplea la metodología propuesta en las normativas ISO 7539 [25] y ASTM E1820 [26] para el cálculo del umbral de propagación en probetas compactas C(T), empleando la carga el momento en el que la fisura comienza a propagar en el ensayo (Ecuación (8) y (9)):

$$K_{IEAC}^N = \frac{P_Q}{(BB_N W)^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (8)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left[\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left(0.886 + 4.64 \frac{a}{W} - 13.32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right) \right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (9)$$

donde P_Q es la carga para la cual la fisura comienza a propagar en la probeta, B es el espesor de la probeta y B_N es el espesor neto en caso de que se hayan realizado ranuras laterales, W es el ancho de la probeta y $f(a/W)$ es un factor geométrico dependiente de la profundidad del defecto, a , y del ancho de la probeta, W .

Programa experimental

Para comprobar la precisión y adecuación de las ecuaciones propuestas (ecuaciones (6) y (7)) es necesario realizar una serie de ensayos adicionales. En concreto, han sido realizados ensayos a fractura en ambiente a baja velocidad de desplazamiento ($6 \cdot 10^{-8}$ m/s) sobre dos probetas C(T) prefisuradas, para el cálculo de K_{IEAC} . Posteriormente, ha sido repetido este ensayo en las mismas condiciones, pero esta vez con probetas C(T) entalladas (ver Figura 4), cuyos radios de entalla son 0.25 mm, 0.50 mm, 1.00 mm, y 2.00 mm. De cada radio de entalla se han duplicado los ensayos para conseguir una mayor representatividad en los resultados.

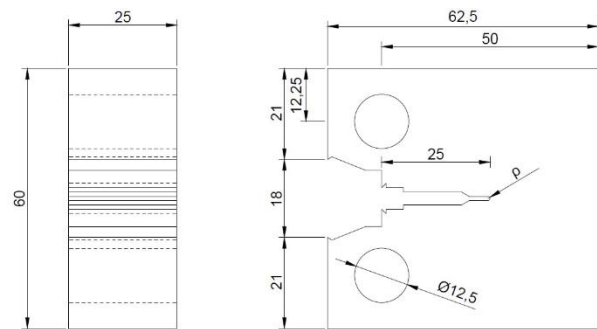


Figura 4. Geometría de las probetas C(T) empleadas.

En total, 10 probetas C(T) han sido ensayadas. La Tabla 3 recoge los ensayos realizados.

Tabla 3. Ensayos realizados en función del radio de entalla.

Radio, ρ (mm)	0.00	0.25	0.50	1.00	2.00
Nº de ensayos	2	2	2	2	2

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores obtenidos experimentalmente para estos para estos parámetros son los que se muestran en la Tabla 4.

La media aritmética de los umbrales de propagación en EAC de las dos probetas prefisuradas ($\rho = 0.00$ mm) ha sido considerada como K_{IEAC} . En este caso, dicho valor es de $60.29 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$.

Tabla 4. Resultados experimentales analizados en este estudio.

Nº de ensayo	Radio, ρ (mm)	P_Q (kN)	K_{IEAC}^N (MPa·m ^{0.5})
1	0.00	27.86	67.42
2	0.00	23.12	53.16
3	0.25	34.41	63.21
4	0.25	34.85	64.01
5	0.50	38.26	70.28
6	0.50	42.75	78.52
7	1.00	44.50	81.74
8	1.00	42.93	78.87
9	2.00	56.24	103.31
10	2.00	54.20	99.56

Simulación por elementos finitos

Se ha empleado el programa ABAQUS (versión 6.13) para la realización de un análisis por elementos finitos del campo tensional en las proximidades de la entalla en el momento en el que la fisura comienza a propagar. La simulación ha sido ejecutada en condiciones elástico-lineales [9]. La Figura 5 representa el campo tensional en la entalla y el mallado de la probeta, que ha sido creado mediante elementos hexaédricos y es mucho más refinado en las proximidades del defecto debido a los elevados gradientes tensionales en esa zona.

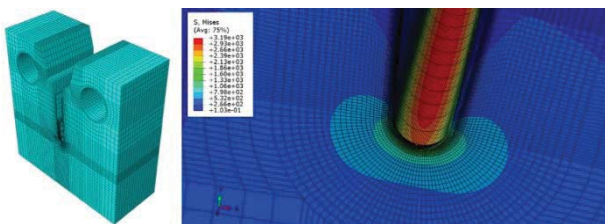


Figura 5. Mallado de la probeta C(T) y campo tensional en el frente de entalla.

Han sido obtenidas las curvas tensión-distancia desde el frente de entalla (en el medio de la sección) de cada ensayo realizado para la carga a la cual empieza a propagar la fisura en cada ensayo. Se observa en la Figura 6 como las curvas se cruzan, aproximadamente, en un punto, como postula este trabajo.

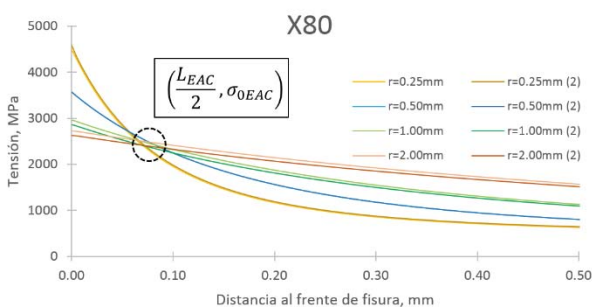


Figura 6. Curvas tensión-distancia al frente de entalla obtenidas mediante simulación por elementos finitos.

El punto donde se cortan las curvas sirve para calcular la distancia crítica y la tensión inherente en EAC. En este caso, para el acero API X80 en condiciones de polarización catódica (5 mA/cm²), el valor de la distancia crítica es $L_{EAC} = 0.184$ mm ($L_{EAC}/2 = 0.092$ mm) y el valor de la tensión inherente es $\sigma_{0EAC} = 2517.25$ MPa.

Predicciones del Método del Punto

La Figura 7 muestra las predicciones que el método del punto ofrece. Se muestran dos curvas de predicciones (empleando el valor experimental de L_{EAC} y el mejor ajuste por mínimos cuadrados, L_{EAC-MA}) del umbral de propagación aparente en EAC y los resultados experimentales obtenidos. Las predicciones de los umbrales de propagación aparentes (K_{IEAC}^N) se han generado al introducir el valor de L_{EAC} (o L_{EAC-MA}) en la ecuación (7) junto con el valor de K_{IEAC} obtenido experimentalmente con probetas C(T) prefisuradas.

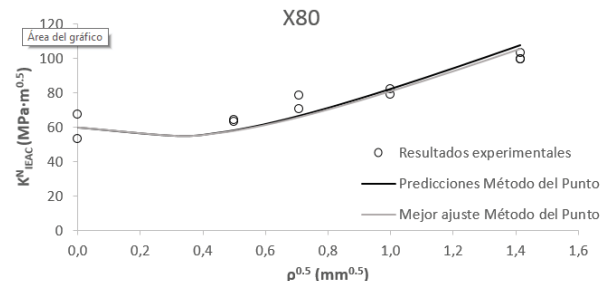


Figura 7. Predicciones del Método del Punto con valores experimentales y con el mejor ajuste de L_{EAC} por mínimos cuadrados.

Como se observa en la Figura 7, las predicciones obtenidas empleando el valor experimental de la distancia crítica en ambiente, L_{EAC} , presentan un alto grado de precisión comparándolas con los resultados de los ensayos experimentales realizados.

CONCLUSIONES

Este trabajo aplica la teoría de las distancias críticas, por primera vez, para analizar la fisuración asistida por ambiente. Se ha estudiado en el acero API X80 en condiciones de polarización catódica (5 mA/cm²).

La calibración de los parámetros de la TDC ha sido realizada mediante una combinación de ensayos experimentales y análisis del campo tensional en el frente del defecto, por elementos finitos.

Se observa un claro efecto entalla, creciendo el umbral de propagación aparente (K_{IEAC}^N) en EAC a medida que aumenta el radio del defecto.

El valor calculado de la distancia crítica de manera experimental ($L_{EAC} = 0.184$ mm) ofrece unas predicciones fiables de K_{IEAC}^N . El mejor ajuste por mínimos cuadrados, ofrece un valor de $L_{EAC-MA} = 0.197$ mm. La pequeña diferencia entre el valor experimental y

el mejor ajuste unido a la precisión en las predicciones, prueban la capacidad del método del punto y, por tanto, de la TDC, para analizar procesos de fisuración asistida por ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la financiación recibida de los proyectos MAT2014-58443-P y MAT2014-58738-C3-3-R desarrollado por la Universidad de Cantabria.

REFERENCIAS

- [1] J.M. Hamilton, The challenges of deep-water arctic development, *Int. J. Offshore Polar Eng.* (2011) 21:241–247.
- [2] G.P. Tiwari, A. Bose, J.K. Chakravarty, S.L. Wadekar, M.K. Totlani, R.N. Arya, R.K. Fotedar, A study of internal hydrogen embrittlement of steels, *Mater. Sci. Eng. A.* (2000) 286: 269–281.
- [3] J. Rehrl, K. Mraczek, A. Pichler, E. Werner, Mechanical properties and fracture behavior of hydrogen charged AHSS/UHSS grades at high-and low strain rate tests, *Mater. Sci. Eng. A.* (2014) 590:360–367.
- [4] M. Elboujdaini, Hydrogen-Induced Cracking and Sulfide Stress Cracking, Uhlig's corrosion handbook, John Wiley and Sons, Ottawa (2011) 183-194..
- [5] L.S. Nui, C. Chehimi, G. Pluvinage, Stress field near a large blunted tip V-notch and application of the concept of the critical notch stress intensity factor (NSIF) to the fracture toughness of very brittle materials, *Eng. Fract. Mech.* (1994) 49:325–335.
- [6] G. Pluvinage, Fatigue and fracture emanating from notch; the use of the notch stress intensity factor, *Nucl. Eng. Des.* (1998) 185:173–184.
- [7] W. Fenghui, Prediction of intrinsic fracture toughness for brittle materials from the apparent toughness of notched-crack specimen, *J. Mater. Sci.* (2000) 35:2543–2546.
- [8] B. Atzori, P. Lazzarin, S. Filippi, Cracks and notches: Analogies and differences of the relevant stress distributions and practical consequences in fatigue limit predictions, *Int. J. Fatigue.* (2001) 23:355–362.
- [9] D. Taylor, The Theory of Critical Distances, Elsevier, Oxford (2007).
- [10] V. Madrazo, S. Cicero, T. García, Assessment of notched structural steel components using failure assessment diagrams and the theory of critical distances, *Eng. Fail. Anal.* (2014) 36:104–120.
- [11] S. Cicero, V. Madrazo, I. Carrascal, R. Cicero, Analysis of notch effect in fracture micromechanisms, in: *Am. Soc. Mech. Eng. Press. Vessel. Pip. Div. PVP* (2012) 847–856.
- [12] D. Taylor, P. Bologna, K. Bel Knani, Prediction of fatigue failure location on a component using a critical distance method, *Int. J. Fatigue.* (2000) 22:735–742.
- [13] H. Neuber, Theorie der technischen Formzahl, *Forsch. Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesens.* (1936) 7:271–274.
- [14] H. Neuber, Theory of notch stresses: principles for exact calculation of strength with reference to structural form and material, Springer Verlag, Berlin (1958).
- [15] R.E. Peterson, Notch sensitivity, *Met. Fatigue.* (1959) 293–306.
- [16] D. Taylor, The theory of critical distances: A history and a new definition, *SDHM Struct. Durab. Heal. Monit.* (2006) 2:1–10.
- [17] L. Susmel, D. Taylor, On the use of the theory of critical distances to estimate K_{Ic} and ΔK_{th} from experimental results generated by testing standard notches, *Key engineering materials* (2010). 417-418:25-28.
- [18] K. Tanaka, Engineering formulae for fatigue strength reduction due to crack-like notches, *Int. J. Fract.* (1983) 22:R46.
- [19] J.M. Whitney, R.J. Nuismer, Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations, *J. Compos. Mater.* (1974) 8:253–265.
- [20] M. Creager, P.C. Paris, Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking, *Int. J. Fract. Mech.* (1967) 3:247–252.
- [21] D.A. Jones, Principles and prevention of corrosion, Prentice-Hall, Inc. Simon & Schuster, New Jersey (1996).
- [22] I.M. Bernstein, G.M. Pressouyre, Role of traps in the microstructural control of hydrogen embrittlement of steels, *Noyes Publ, Park Ridge, NJ, Pittsburgh* (1988).
- [23] J.A. Alvarez, F. Gutiérrez-Solana, Elastic-plastic fracture mechanics based methodology to characterize cracking behavior and its application to environmental assisted processes, *Nucl. Eng. Des.* (1999) 188:185–202.
- [24] B. Arroyo, J.A. Álvarez, R. Lacalle, C. Uribe, T.E. García, C. Rodríguez, Analysis of key factors of hydrogen environmental assisted cracking evaluation by small punch test on medium and high strength steels, *Mater. Sci. Eng. A.* (2017) 691:180–194.
- [25] ISO 7539 Corrosion of metals and alloys. Stress corrosion testing. Parts 1 to 11 (2015).
- [26] ASTM E1820-18, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2018).