

DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE FISURACION EN RELACION CON LA INTEGRAL J

J.A. Alvarez ; G. Méndez; F. Gutiérrez-Solana ; I. Gorrochategui; J.Laceur

Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Tierra, el Terreno y los Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Avenida de Los Castros s/n, 39005 Santander

Resumen. Los ensayos de tenacidad basados en la medida de la integral J han conseguido obtener un gran éxito en la caracterización del comportamiento en fractura elasto-plástica de los materiales metálicos. Gran parte de dicho éxito es debido a la facilidad y rapidez en su realización, que hace pensar en su utilización en otros campos, como es la CBT, en los que el material presenta fisuración subcrítica bajo estado elasto-plástico. Conocida la velocidad de propagación de fisuras en un ensayo de determinación de la curva R de la integral J, y en base a las leyes de deformación elasto-plástica del material se puede obtener analíticamente la respuesta carga-desplazamiento, y al contrario, a partir de ésta, se pueden deducir las leyes de velocidad de propagación de fisura, sean éstas críticas o subcríticas. Siguiendo esta metodología analítica se han determinado las velocidades de fisuración obtenidas en ensayos de determinación de la curva J_R para distintas velocidades de sollicitación en diferentes materiales y medios.

Abstract: Toughness test based on the measurement of J integral have obtained great success in the characterisation of the elastic-plastic fracture behaviour of metals. A great part of this success is owing to the ease and quikness with which these test are carried out. This leads to the possibility of using them in other fields, such as SCC, where the material present subcritical cracking in elastic-plastic regime. Once the crack propagation rate is known from a J-integral R-curve, based on material elastic-plastic behaviour equation, the load-displacement response can be calculated. Viceversa, from the load-displacement curve it is also possible to derive the crack propagation rate laws which may be either critical or subcritical. The crack propagation rates obtained in J_R determination tests performed at different displacement rates on two materials and in different environments have been determined following this methodology.

1. INTRODUCCION

La seguridad de las estructuras exige actualmente un conocimiento exhaustivo del comportamiento ante fractura de los materiales presentes en las mismas. Para situaciones de comportamiento elasto-plástico esta determinación se realiza a través de la curva de resistencia a la fractura de sus materiales constitutivos basada en la integral J, o curva J_R . La relativa sencillez de la metodología de ensayo, así como la amplia experiencia existente en su utilización, hacen aconsejable su extensión a situaciones, como es la Corrosión Bajo Tensión, en la que se presentan conjuntamente fisuraciones subcríticas y comportamiento elasto-plástico.

Basándose en estos conceptos, han sido varios los intentos para modelizar el comportamiento de los aceros frente a fractura elasto-plástica. En esta línea el Eléctric Research Power Institut ha desarrollado un procedimiento analítico mediante el cual es posible obtener la relación $J-\Delta a$, curva J_R , a partir de las características mecánicas del material [1].

En este trabajo se aborda, apoyándose en la metodología analítica desarrollada por EPRI, la determinación de la velocidad de propagación de fisuras, sean estas críticas o subcríticas, durante el ensayo de determinación de la curva J_R . Asimismo se analiza la influencia que determinados parámetros como la velocidad de sollicitación, el medio o el material, tienen sobre esta propagación.

2. ESTUDIO ANALITICO

La metodología propuesta por EPRI basándose en la geometría de la probeta ensayada y en las características mecánicas del material, modelizadas según una ley del tipo Ramberg-Osgood, permite obtener la relación carga-desplazamiento para cada longitud de fisura, a. Posteriormente, apoyándose en la ley de variación de la velocidad de propagación se obtiene igualmente la relación carga-desplazamiento que conduce a la determinación de la curva $J-\Delta a$. Este análisis se esquematiza en la Figura 1.

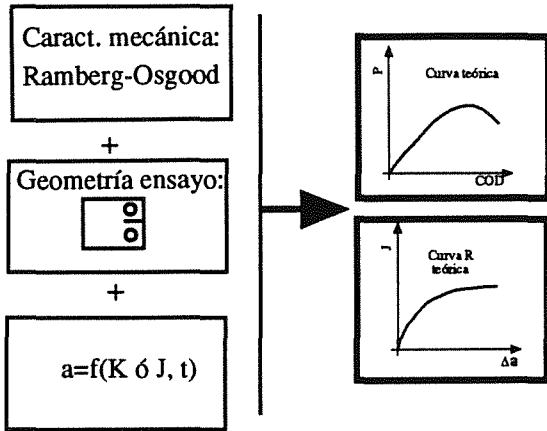


Figura 1. Esquema del procedimiento analítico seguido para determinar la curva J_R .

Inversamente, es posible, partiendo de una curva carga-desplazamiento obtenida experimentalmente y conociendo las características mecánicas y geométricas del material, obtener la ley de variación de la fisura con el tiempo, y por tanto, su velocidad de propagación. Ello se esquematiza en la Figura 2.

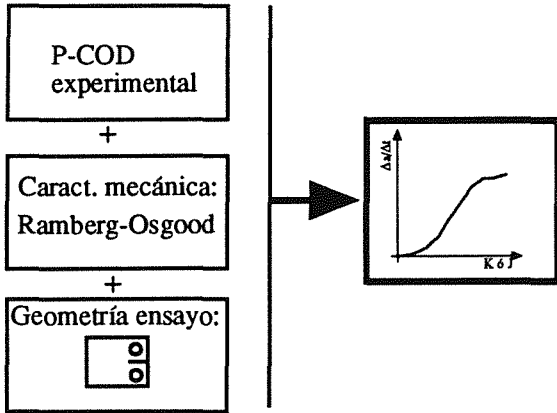


Figura 2. Esquema del procedimiento analítico para determinar velocidades de propagación.

Los parámetros necesarios para definir el comportamiento de un material a lo largo de un ensayo J_R se obtiene de acuerdo a la formulación propuesta por EPRI a partir de la ley de Ramberg-Osgood expresada en la forma:

$$\epsilon/\epsilon_0 = \sigma/\sigma_0 + \alpha(\sigma/\sigma_0)^n \quad (1)$$

donde α , ϵ_0 , σ_0 y n son obtenidos en un simple ensayo de tracción. Partiendo de estos parámetros, para probetas tipo CT, en las que el desplazamiento en la línea de carga se determina con ayuda de un extensómetro tipo COD, el método EPRI mencionado proporciona la

formulación que permite obtener las relaciones carga-desplazamiento, P-COD.

Para probar la metodología descrita en las Figuras 1 y 2, se realiza un ensayo experimental sobre una probeta tipo CT, del cual se obtiene una curva del tipo P-COD. Tomando como base esta curva experimental y apoyándose en la formulación propuesta por EPRI, es posible definir la ley de crecimiento de la fisura durante el ensayo. De la Figura 3 se puede deducir dicha ley de crecimiento analizando la intersección de la curva P-COD experimental con las curvas analíticas P-COD para diferentes longitudes de fisura (líneas discontinuas). A partir de la ley así obtenida, y apoyándose en la metodología descrita en la Figura 1, se obtiene la curva P-COD analíticamente. La eficiencia de la metodología descrita se verifica cuando, invirtiendo el proceso, desde la ley de variación de velocidades de propagación se obtiene una relación P-COD coincidente con la experimental de partida (Figura 4). De este modo se confirma la posibilidad de utilizar estos estudios analíticos en la determinación de la velocidad de propagación.

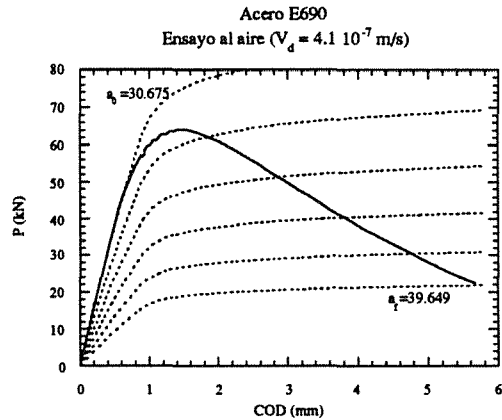


Figura 3. Determinación de la evolución de la fisura a partir de la curva P-COD.

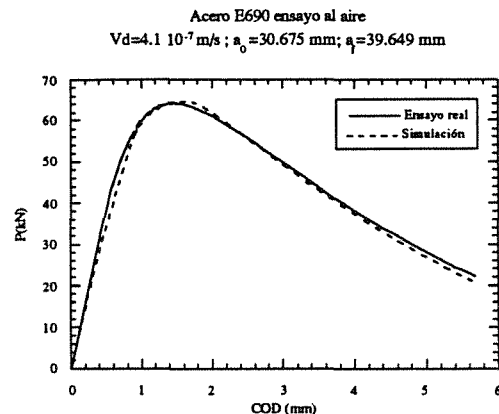


Figura 4. Comparación de las curvas P-COD analítica y experimental.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para complementar la metodología analítica se ha realizado un trabajo experimental de apoyo. Se efectuaron ensayos de determinación de la integral J_R sobre diferentes materiales y medios agresivos.

El procedimiento seguido para la determinación de las curvas $J-\Delta a$ está propuesto por la Norma Europea ESIS-PI-92 [2]. Se utilizaron probetas tipo CT (Compact Specimen) de espesor 25 mm, sobre las que se realizaron ranuras laterales del 20% del espesor neto.

El método empleado para la determinación de las longitudes de fisura durante el ensayo fue el de probeta única, con descargas para determinación de la flexibilidad.

Los ensayos se realizaron sobre dos aceros microaleados de alto y medio límite elástico (E690 y E500) respectivamente, cuya composición química aparece en la Tabla 1. Los dos han sido sometidos a tratamiento de temple y revenido, siendo su microestructura bainítica [3].

Tabla 1. Composición química de los aceros utilizados en la experimentación.

ELEMENTO	E500	E690
C	0.063	0.135
S	0.001	0.001
P	0.006	0.004
Si	0.23	0.241
Mn	1.36	1.1
Ni	0.585	1.518
Cr	0.115	0.496
Mo	0.195	0.465
Cu	0.103	0.18
Sn	0.003	0.009
Al	0.017	0.078
V	0.048	<0.003
Ti	<0.003	0.003
Co	0.011	0.021
Nb	<0.004	<0.004
B	0.0004	0.0026
As	0.016	0.022
Pb	0.0008	<0.0005
N	0.007	0.007

Las características mecánicas, así como los parámetros de Ramberg-Osgood utilizados en la experimentación se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características mecánicas de los aceros.

ACERO TIPO	E500	E690
DUREZA HV	202	292
Sy(0,2%) MPa	530	840
Sr(MPa)	640	915
e%	9	6.5
α	2.55	1.56
n	9.86	17

Con el objetivo de analizar además del material, el efecto de la velocidad de sollicitación y el del medio ambiente, se realizaron ensayos en control de desplazamiento a diferentes velocidades de sollicitación, V_d , desde $8.3 \cdot 10^{-8}$ m/s a $4.1 \cdot 10^{-6}$ m/s en aire y H_2S . En la Tabla 3 se incluye un resumen de los ensayos realizados, en función de la velocidad de sollicitación. Para cada situación se obtuvo la curva P-COD, de la que se dedujo la curva J_R correspondiente.

Tabla 3. Velocidad de sollicitación, V_d , de los ensayos realizados.

Material	AIRE	H2S (*)
E690	4.1x10-6m/s 4.1x10-7m/s	8.33x10-8 m/s
E500	4.1x10-6m/s	8.33x10-8 m/s

(*) Realizados por Creuseot-Loire Industries.

Los ensayos J_R realizados al aire (Figuras 5 a 7) desvelan para ambos materiales una alta tenacidad. Especialmente en el acero de medio límite elástico (E500), que supera ampliamente los límites de la zona de validez propuestos por la normativa vigente [2], (Figuras 5). La rotura en este ambiente es dúctil, por formación de microhuecos, para ambos materiales.

De las Figuras 6 y 7 (acero E690) se deduce que no hay un efecto apreciable de la velocidad de sollicitación en el rango utilizado sobre el comportamiento a fractura de los materiales ensayados al aire.

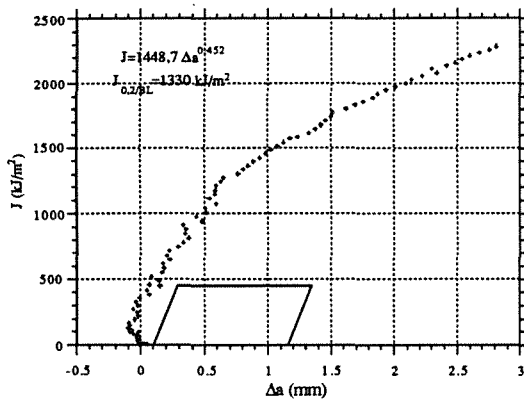


Figura 5. Curva J_R del acero E500 ensayado al aire, con una velocidad de sollicitación $V_d=4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s.

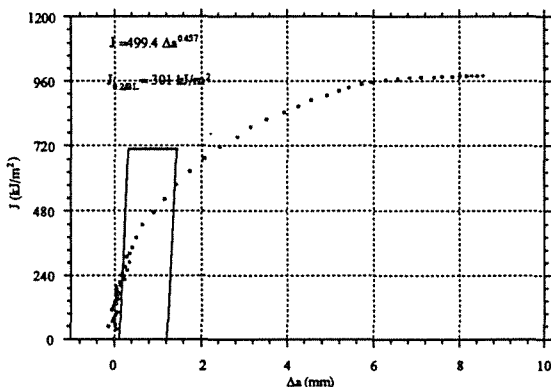


Figura 6. Curva J_R del acero E690 ensayado al aire, con una velocidad de sollicitación $V_d=4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s.

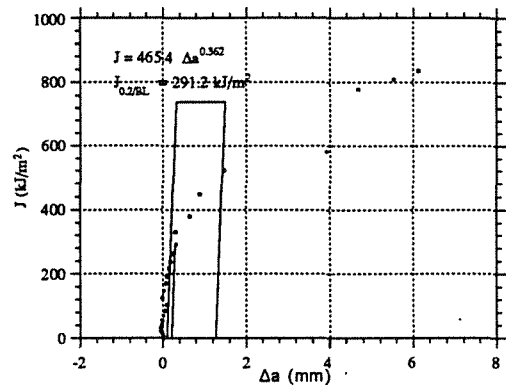


Figura 7. Curva J del acero E690 ensayado al aire, con una velocidad de sollicitación $V_d=4.1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

A partir de las curvas P-COD obtenidas, siguiendo el esquema de la Figura 2, se deduce en cada caso la evolución de la velocidad de propagación de la fisura en función de los parámetros de sollicitación, J ó K_{I_f} , definido este último a partir de la parte elástica de J , J_e y considerando siempre estados de deformación plana. La metodología establece el valor de fuerza motriz, J_f ó K_{I_f} , para el que se inicia aparentemente la fisuración, obtenido por la separación de las curvas P-COD analítica para la fisura inicial y experimental. A partir de este punto la evolución de la velocidad de propagación sigue, en función tanto de J como K_{I_f} , tendencias análogas para todos los casos analizados. La Figura 8 resume la forma más habitual de relación entre la velocidad de propagación ($\Delta a/\Delta t$) y K_{I_f} , representada la primera en escala logarítmica. Esta relación ofrece tres zonas diferenciadas:

- Zona de propagación exponencial (I) de la fisura, que se extiende desde el instante en que se alcanza el valor umbral de iniciación de la fisura, $K_{I_{f,i}}$, hasta que se llega a la carga máxima de ensayo, $P_{máx}$.
- Zona de transición (II), en la que la propagación de la fisura se acelera hasta alcanzar una velocidad límite a la que se estabiliza, todo ello para valores casi constantes en torno al máximo de K_{I_f} , coincidiendo con el inicio de la pérdida de capacidad de carga de la probeta.
- Zona de estabilidad de la velocidad de propagación (III), es decir de crecimiento constante de la fisura, asociado a la pérdida continuada de capacidad de carga de la probeta.

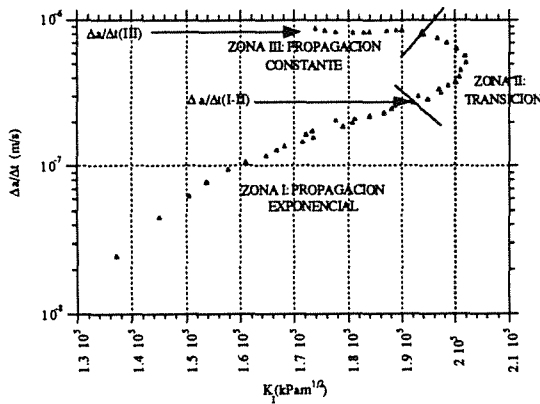


Figura 8. Variación de la velocidad de propagación en función del parámetro K_I , durante un ensayo J_R .

De acuerdo con lo establecido, observado sistemáticamente en todos los ensayos realizados, cada zona se identifica con una situación propia de la curva de comportamiento P-COD. En la Figura 9 se pueden distinguir la limitación ya descrita de zonas en una curva P-COD:

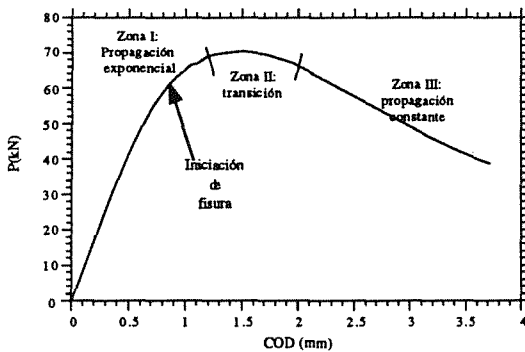


Figura 9. Zonas de propagación diferenciada sobre una curva P-COD.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la velocidad de propagación obtenidos analíticamente para todos los ensayos realizados. En todos los casos se ha tomado como parámetro comparativo las velocidades de paso de la zona I a la zona II, $\Delta a/\Delta t$ (I-II) y de estabilidad, $\Delta a/\Delta t$ (III), definidas de acuerdo con la Figura 8.

Tabla 4. Resumen de resultados de propagación.

Acero Ambiente	V_d (m/s)	$\Delta a/\Delta t(I-II)$ m/s	$\Delta a/\Delta t(III)$ m/s
E690 AIRE	$4.1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$
E690 AIRE	$4.1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
E690 H_2S	$8.3 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1.6 \cdot 10^{-5}$
E500 AIRE	$4.1 \cdot 10^{-6}$	$0.5 \cdot 10^{-6}$	$2.1 \cdot 10^{-6}$
E500 H_2S	$8.3 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$
E690 (*) AIRE	$8.3 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$
E500 (*) AIRE	$8.3 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$

(*) Extrapolando

En las Figuras 10 y 11 se analiza la evolución de la velocidad de propagación para los dos aceros estudiados en el caso de ensayos al aire con una velocidad de sollicitación de $4.1 \cdot 10^{-6}$ m/s. En ambos casos las curvas de caracterización de velocidad presentan un aspecto similar. En el acero tipo E690 se ha representado la velocidad como función de los parámetros J, (integral J) y J_e (parte elástica de J). Para el acero E500 sólo se representa la velocidad en función de la integral J.

En estas representaciones se establecen las mismas tres zonas de velocidad de propagación. Se puede observar que el acero tipo E500, de mayor ductilidad y tenacidad, presenta una velocidad de crecimiento estable del orden de $2.1 \cdot 10^{-6}$ m/s para el acero tipo E500. Esta velocidad es más rápida, de orden de 10^{-5} m/s para el acero E690. Asimismo la velocidad en el inicio de la zona de transición es de $5 \cdot 10^{-7}$ m/s para el acero E500 y aproximadamente de $2 \cdot 10^{-6}$ m/s para el acero E690, es decir más lento de nuevo es el acero más tenaz y dúctil.

Por tanto, se establece una relación de velocidades en zonas equivalentes en torno a 4 a 5 veces superior para el acero menos tenaz. Esta relación, y su orden de magnitud, se corresponde, en una primera aproximación, con la relación existente entre los correspondientes módulos de desgarro, definidos a partir de la pendiente de la curva J_R .

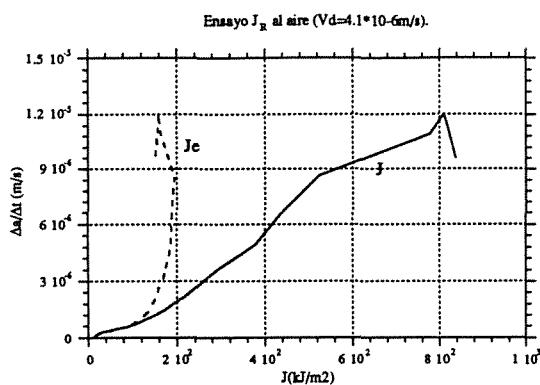


Figura 10. Variación de la velocidad de fisuración en función de J y J_c , para el acero E690 ensayado al aire.

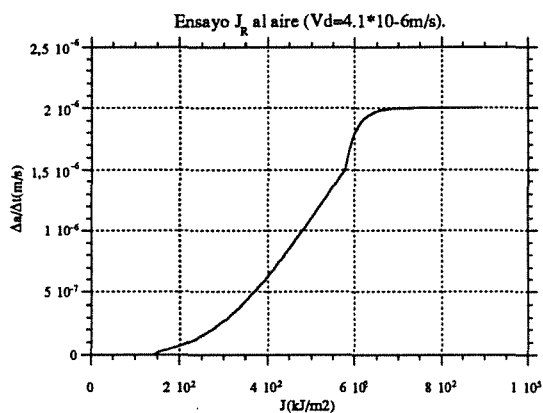


Figura 11. Variación de la velocidad de fisuración en función de J para el acero E500, ensayado al aire.

El efecto de la velocidad de sollicitación sobre la velocidad de propagación se puede observar en la Figura 12. En ella se representa la velocidad de propagación modelizada frente al parámetro K_I para un mismo material (acero E690) ensayado a dos velocidades diferentes $4.1 \cdot 10^{-6}$ m/s y $4.1 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Queda patente la influencia que la velocidad de sollicitación ejerce sobre la propagación. La velocidad de esta prácticamente se multiplica un orden de magnitud al elevar un mismo orden de magnitud la velocidad de sollicitación, de forma que la relación entre ambas velocidades permanece constante en el rango ensayado para un material y ambiente dado. Ello concuerda con lo observado, (Figuras 6 y 7), que las curvas J_R resultantes, para estas dos velocidades de sollicitación diferentes, no ofrecen diferencias sustanciales entre sí.

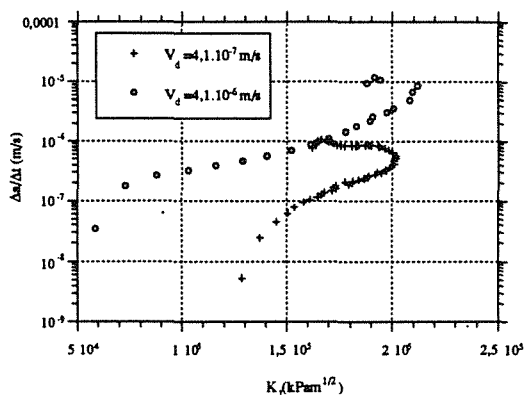


Figura 12. Influencia de la velocidad de sollicitación en la velocidad de propagación en el acero E690 ensayado.

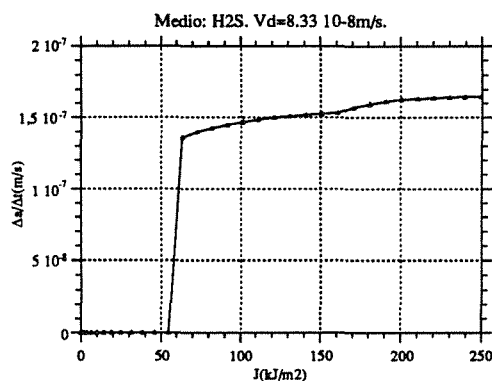


Figura 13. Variación de la velocidad de fisuración en función de J para el acero E500 en ambiente H_2S .

La velocidad de sollicitación en ambiente agresivo es en todos los casos inferior a la misma para ensayos realizados al aire. Con objeto de comparar diferentes ambientes para una misma velocidad de ensayo, se ha extrapolado los resultados de propagación para obtener los valores correspondientes a la misma velocidad de sollicitación que los ensayos en medio agresivo. Para el acero E690 la extrapolación se hace teniendo en cuenta la constancia observada en la relación entre velocidades de sollicitación y propagación. Para el E500 se hace en base a la relación entre ambos materiales. Estos valores se dan en las últimas filas de la Tabla 4. La influencia del medio en los parámetros de propagación se determina por comparación entre estos valores obtenidos por extrapolación cuando el ambiente es aire y los obtenidos por técnica analítica cuando el ambiente es H_2S , a partir de la experimentación realizada.

Para el acero E690 se observa un gran aumento de la velocidad de fisuración en el ambiente agresivo con respecto al ensayado al aire. Tomando como parámetro

comparativo la velocidad de propagación de estabilidad (zona III), la Tabla 4 muestra un aumento de la misma de $2 \cdot 10^{-7}$ a $1.6 \cdot 10^{-5}$ m/s al pasar de aire a H_2S . En el caso del acero E500 se pasa la de $4 \cdot 10^{-8}$ a $1.7 \cdot 10^{-7}$ m/s, lo que significa una menor susceptibilidad de este acero al ambiente agresivo. El aumento de velocidad de propagación al pasar a un medio más agresivo es menos significativo en el caso del acero E500, aproximadamente 4 veces para los ambientes ensayados, frente al acero E690, unas 80 veces.

Esta diferencia concuerda con el mantenimiento de una importante tenacidad en el medio agresivo para el acero E500, mientras que el acero E690 se fragiliza fuertemente llegando a tener una rotura con plastificación contenida en el fondo de fisura. Las Figuras 13 y 14 son un reflejo de estas diferencias mostrando para el acero E500 una zona III de velocidad de propagación estabilizada, que desaparece para el acero E690, por su comportamiento frágil.

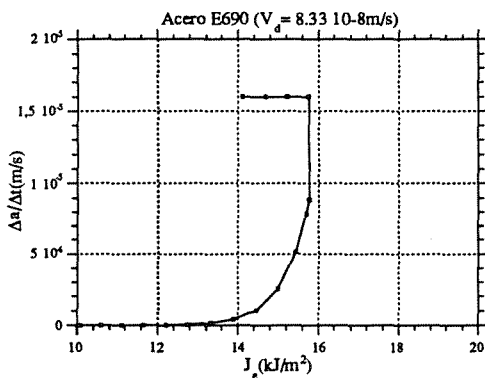


Figura 14. Variación de la velocidad de fisuración en función de J_e , para el acero E690 en ambiente H_2S .

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una metodología analítica adecuada para evaluar la velocidad de fisuración en situaciones de rotura elasto-plástica.

Se puede modelizar la ley de crecimiento de la velocidad en función de parámetros relacionados con la fuerza motriz como K_I ó J . Existen tres zonas diferenciadas de propagación que se asocian a diferentes zonas de las curvas P-COD.

La velocidad de sollicitación tiene una influencia decisiva sobre la velocidad de fisuración. Para un determinado material y ambiente la relación entre ambas es constante. Los materiales de mayor tenacidad tienen menores velocidades de fisuración en zonas equivalentes, pudiendo ser su relación asociada a la

relación entre los respectivos módulos de desgarramiento.

La velocidad de fisuración aumenta con la agresividad del ambiente para una velocidad de sollicitación determinada la susceptibilidad de este hecho es diferente en cada material. La dependencia mostrada de la velocidad de propagación en procesos de fractura a la velocidad de sollicitación hace pensar en la existencia de una velocidad de sollicitación crítica, para cada material y ambiente, por encima de la cual no pueden existir fenómenos de propagación subcrítica [4], ya que se provocarían fenómenos de rotura.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se engloba dentro de un proyecto de investigación de la Comunidad Europea (CECA Nº 7210-KB/934) y del proyecto CYCIT MAT 93-0970-CE. Quede patente el agradecimiento de los autores a ambos organismos, así como a Creuseot-Loire Industries por la documentación aportada para este trabajo.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Electric Power Research Institut. "An engineering approach for elastic-plastic fracture analysis". July 1981

[2] ESIS. "Recommendations for Determining the Fracture Resistance of Ductile Materials". ESIS-PI-92 EGF. January 1992

[3] Alvarez J.A., Gutierrez-Solana F., Mendez G., Gonzalez J. y Fernandez B. ECSC Interim Report "Stress Corrosion Cracking on Weldable Microalloyed Steels". October 1993

[4] Harle B.A. y Beavers J.A. "Low-pH Stress Corrosion Crack Propagation in API X-65 Line Pipe Steels". Corrosion -Vol 49, nº10(1993).