

INTERPRETACIÓN FRACTAL DEL ÍNDICE DE TOLERANCIA AL TAMAÑO DE GRIETA Y DE LA TENACIDAD DE FRACTURA EN EL ACERO SAF 2205

O.A. HILDERS¹ y N. ZAMBRANO²

¹Centro de Investigación y Desarrollo de Aceros Inoxidables de la UCV (CINDACI), Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela (UCV), Apartado 47514, Caracas 1041-A, Venezuela.

²Vice-Presidencia de la Fundación Instituto de Mejoramiento Profesional del Colegio de Ingenieros de Venezuela (FIMP-CIV), Av. Principal de Quebrada Honda, Los Caobos, Caracas Zona Postal 1050, Venezuela.

Recibido: marzo de 2007

Recibido en forma final revisado: julio de 2007

RESUMEN

A partir del modelo analítico de Schwalbe y principios fractales basados en la topografía de superficies fracturadas por tensión, se calcularon el Índice de Tolerancia al Tamaño de Grieta ℓ_c , y la Tenacidad de Fractura K_{IC} , para el acero austenoferrítico SAF 2205 envejecido a 475 °C entre 0 y 120 h. Se encontró que K_{IC} , ℓ_c y la Dimensión Fractal de las superficies de fractura, disminuyen su valor con el aumento del tiempo de envejecimiento, en forma monótona. Aunque el mecanismo de separación fue el mismo para todas las condiciones experimentales (unión o coalescencia de microcavidades), sin embargo, la irregularidad de la topografía de fractura fue menor para tiempos mayores de tratamiento a 475 °C. Los valores de K_{IC} obtenidos, son similares a los reportados en la literatura.

Palabras clave: Fractal, Índice de Tolerancia al Tamaño de Grieta, Tenacidad de Fractura, Acero SAF 2205.

CRACK SIZE TOLERANCE INDEX AND FRACTURE TOUGHNESS IN SAF 2205 TYPE STEEL FROM A FRACTAL VIEWPOINT

ABSTRACT

Using Schwalbe's analytical model and fractal principles based on tension fracture surface topography, the Crack Size Tolerance Index ℓ_c , and the Fracture Toughness K_{IC} , were predicted for the austenoferritic SAF 2205 type steel aged at 475 °C between 0 and 120 h. It was observed that K_{IC} , ℓ_c and the Fractal Dimension of the fracture surfaces decrease monotonically as the time of aging increases. Although the fracture mechanism of separation was the same for all the interval of aging times (micro-void coalescence), the higher the time at 475 °C, the smaller the tortuosity of the fracture surfaces. The K_{IC} values from the literature closely resemble the present results.

Keywords: Fractal, Crack Size Tolerance Index, Fracture Toughness, SAF 2205 Type Steel.

INTRODUCCIÓN

La tenacidad relativa de ciertos materiales estructurales se mide frecuentemente mediante el denominado Índice de Tolerancia al Tamaño de Grieta ℓ_c (Brown y Srawley, 1970; Barsom y Rolfe, 1999), el cual expresa dimensionalmente la longitud de grieta que se asocia al momento crítico en el cual se alcanza el valor de K_{IC} , o Tenacidad de Fractura para un estado plano de deformación y modo I de separación. Este índice se expresa mediante la relación:

$$\lambda_c = \left(K_{IC} / \sigma_{ys} \right)^2 \quad (1)$$

donde:

σ_{ys} es el Esfuerzo de Fluencia en tensión. Dado que en las aplicaciones de ingeniería es deseable que las estructuras toleren grandes defectos sin fallar, ℓ_c debe poseer el mayor valor posible (Conrad *et al.* 1978). Por otra parte, en algunas aleaciones metálicas, como el acero tipo dúplex SAF 2205 (austenoferrítico), la gran plasticidad de la microestructura (lo cual se observa en los procesos de deformación), determina en general valores de K_{IC} altos y de difícil evaluación mediante métodos estándar (De Vedia, 1986; Nevalainen, 1997). Sin embargo, ciertos métodos que toman en cuenta el efecto de algunas propiedades mecánicas de

tracción y características microestructurales, han sido aplicados con frecuencia para estimar la Tenacidad de Fractura en este tipo de material (Chipperfield y Knott, 1975; Schwalbe, 1977; Kamp *et al.* 2002). En tal sentido, un parámetro importante a ser tomado en cuenta durante los procesos de deformación plástica en materiales de gran tenacidad, es el tamaño de cavidad, el cual conduce a la morfología de fractura dúctil conocida como de «microvoids» (Pardo y Hutchinson, 2000; Khoo y Hruddy 2006). Uno de los modelos que conjuga o une algunas propiedades mecánicas y constantes del material con el mencionado factor de la microestructura, ha sido el propuesto por Schwalbe (1977), en el cual también se ha prestado atención al estado de deformación presente en tensión, el que normalmente corresponde, en el caso de una probeta de tracción cilíndrica, a un estado o condición axisimétrica, y no a un estado de deformación plana. El modelo en cuestión viene expresado como:

$$K_{IC} = \frac{\sigma_{ys}}{(1-2\nu)} \left\{ \pi(1+n)d_T \left[\frac{E \varepsilon_f}{3\sigma_{ys}} \right]^{(1+n)} \right\}^{1/2} \quad (2)$$

donde:

ν es la llamada relación de Poisson; n es el índice de endurecimiento por deformación en tensión; d_T es el elemento microestructural de tamaño mínimo, es decir, el tamaño de cavidad promedio final en el momento de la separación, que caracteriza o asegura el desarrollo de una grieta en los procesos de fractura dúctil; E es el módulo de Young y finalmente, ε_f es la Deformación Real de Fractura en Tensión, la cual aparece dividida por 3 para hacerla equivalente a la que corresponde a un estado de deformación plana. A partir de este modelo, el Índice de Tolerancia al Tamaño de Grieta (K_{IC}/σ_{ys}^2), puede expresarse según:

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 = \pi(1+n)d_T \left[\frac{1}{(1-2\nu)} \right]^2 \left[\frac{E \varepsilon_f}{3\sigma_{ys}} \right]^{(1+n)} \quad \dots \quad (3)$$

Ahora bien, dada la gran importancia actual que tiene la Dimensión Fractal como una medida de la tenacidad (Mandelbrot *et al.* 1984; Hilders, 2001; Carpinteri *et al.* 2007), ℓ_c podría relacionarse con aquella a través del tamaño de cavidad d_T , el cual determina el grado de irregularidad de las superficies de fractura. Hilders *et al.* (2006), en base a estudios fractográficos cuantitativos aplicados al acero SAF 2205 tratado a 475 °C, han propuesto la relación:

$$d_T = d_{T0} e^{m(DL-1)} \quad (4)$$

donde:

d_{T0} representa el tamaño promedio de los huecos o cavidades en el espacio euclídeo, m se define como la tasa de variación del logaritmo natural de d_T respecto al incremento dimensional fractal ($DL - 1$), en otras palabras: $m = d \ln d_T / d(DL - 1)$ y DL representa el valor de la Dimensión Fractal medida por el método de las secciones verticales (Wiencek *et al.* 2001).

El objetivo del presente trabajo es el de establecer la posibilidad de evaluar ℓ_c y también la Tenacidad de Fractura en el acero dúplex SAF 2205 envejecido a 475 °C en el rango de tiempos comprendido entre 0 y 120 h, a partir de ciertas consideraciones de naturaleza fractal, basadas en el grado de irregularidad encontrado en la topografía de fractura por tensión (el cual tiene su origen en el tamaño de cavidad), tomando en cuenta tanto las propiedades mecánicas como las constantes del material que se definen en el modelo de Schwalbe.

TÉCNICAS EXPERIMENTALES

El acero austenoferrítico estudiado se obtuvo en forma de barra laminada en caliente, con un diámetro de unos 31 mm. La composición química respectiva puede verse en la tabla 1 y la microestructura dúplex en la figura 1. El proceso de preparación de las probetas de tracción, los tratamientos térmicos de solubilización a 1120 °C y de envejecimiento a 475 °C (los últimos realizados durante 1; 2; 6,5; 12; 24; 40 y 120 h), los ensayos de tracción a 25 °C, los análisis por MEB (Microscopía Electrónica de Barrido) y la evaluación fractográfica cuantitativa, se realizaron de acuerdo a lo reportado anteriormente por Hilders *et al.* 2006.

Tabla 1. Composición Química del Acero Dúplex SAF 2205 (% en peso).

Cr	Ni	Mo	N	C	Si	Mn	P	S	Fe
22	5,3	3,2	0,17	0,02	0,12	0,91	0,02	0,02	bal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Índice de Tolerancia al Tamaño de Grieta y Tenacidad de Fractura

La evaluación de ℓ_c se efectuó a partir de los valores de σ_{ys} (0,2%), n y ε_f , los cuales se reportan en la tabla 2 (Ramos, 2004; Hilders *et al.* 1999), así como de los valores de DL que corresponden a las condiciones de envejecimiento mencionadas (Hilders *et al.* 2006). Los valores de la relación de Poisson y el módulo de Young (Thorvaldsson y Nilsson, 1990), son: $\nu = 0,345$ y $E = 190.000$ MPa. Finalmente, los valores para d_{T0} y m fueron 5,47 μm y 4,10 respectivamente

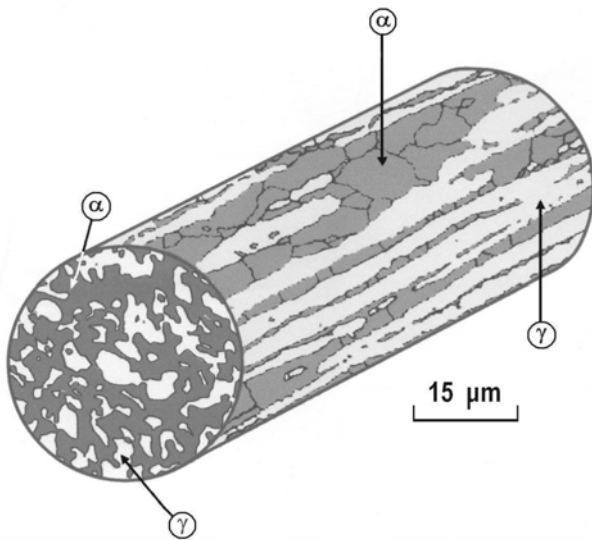


Figura 1. Microestructura dúplex del acero SAF 2205 (Microscopía óptica). La sección transversal muestra dominios equiaxiales de ferrita (fase α oscura) y de austenita (fase β clara). La sección longitudinal muestra dominios alargados de las mismas fases (Hilders *et al.* 2006).

Como se verá posteriormente, los valores obtenidos para ℓ_c a partir de los datos ya mencionados y mediante la ecuación (3), resultan muy similares a los reportados en la literatura. Sustituyendo la ecuación (4) en la (3) y considerando la relación (1), la cual define el Índice de Tolerancia al Tamaño de Grieta, obtenemos:

$$\lambda_c = \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 = d_{T0} e^{m(D_L-1)} \left\{ \left[\frac{1}{(1-2\nu)} \right]^2 \dots \left(\frac{E \varepsilon_f}{3\sigma_{ys}} \right)^{(1+n)} (1+n)\pi \right\} \quad (5)$$

donde:

ℓ_c queda definida como una longitud igual a un múltiplo del tamaño de cavidad dT . El factor o término multiplicativo que aparece entre llaves da una idea de la manera en la cual tanto los cambios experimentados por las propiedades mecánicas como las constantes del material, influyen en ℓ_c . En este sentido, la tabla 2 muestra un aumento sostenido del Esfuerzo de Fluencia σ_{ys} así como también una disminución paralela de la Deformación Real de Fractura $\dot{\varepsilon}_f$ con el incremento del tiempo de envejecimiento a 475 °C, todo ello como resultado del fenómeno de precipitación de la fase α' (Weng *et al.* 2003), favoreciendo la tendencia al

maclado, imponiendo restricciones al deslizamiento y aumentando la posibilidad del inicio de microgrietas.

De igual forma y tal como puede observarse en la tabla 3, el proceso de fragilización progresiva del material con el aumento del tiempo de tratamiento, determina que los valores de la Dimensión Fractal sean cada vez menores, lo que indica una disminución del grado de plasticidad y por lo tanto, de la tortuosidad o rugosidad de la superficie de fractura.

Tabla 2. Propiedades Mecánicas del Acero SAF 2205 Envejecido.

t (h)	σ_{ys} (0,2%) (MPa)	n	$\dot{\varepsilon}_f$
0	637	0,24	1,180
1	726	0,21	1,220
2	759	0,20	1,200
6,5	784	0,19	1,200
12	842	0,18	1,130
24	918	0,16	1,100
40	983	0,16	1,073
120	993	0,14	1,068

Al mismo tiempo puede observarse una disminución simultánea de ℓ_c , lo cual coincide con la observación práctica de que un descenso progresivo de la plasticidad inherente del material, determina que las condiciones críticas que producen la expansión irreversible de una grieta en un ensayo estándar, se alcancen cada vez más temprano.

Tabla 3. Dimensión Fractal, ℓ_c y Tenacidad de Fractura.

t (h)	D_L	ℓ_c (m)	K_{IC} * (MPa(m) ^{1/2})
0	1,19	0,178	268,75
1	1,18	0,128	259,74
2	1,15	0,100	240,02
6,5	1,11	0,077	217,55
12	1,11	0,065	214,67
24	1,10	0,047	199,02
40	1,07	0,038	191,62
120	1,05	0,031	174,84

* Calculado a partir de $\ell_c = (K_{IC} / \sigma_{ys})^2$

Es necesario recordar en este punto, que los valores de ℓ_c (en nuestro caso, comprendidos entre unos 17,8 y 3,1 cm), solamente constituyen un indicador relativo que se expresa mediante una longitud de grieta asociada al valor de la Tenacidad de Fractura, siendo su magnitud obviamente menor al valor físico de la longitud de la grieta (a), que corresponde a las probetas estándar no ensayadas, la cual se expresa, según la NORMA ASTM E399-83 (1989), a través de la relación:

$$a \geq 2,5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (6)$$

Por otra parte, los valores de la Tenacidad de Fractura calculados a partir de los obtenidos para ℓ_c , disminuyen monótonicamente, como era de esperarse, con el tiempo de envejecimiento a 475 °C. Aunque existen muy pocos valores de K_{IC} reportados en la literatura para el acero SAF 2205, estos están en concordancia con los determinados en el presente trabajo. A manera de ejemplo, puede citarse a Nicodemi *et al.* (1992), quienes reportan un valor de $J_{IC} = 0,370 \text{ MJ/m}^2$ [0,370 MPa (m)] para este acero en condición de recocido. El valor respectivo de K_{IC} [282,49 MPa (m)^{1/2}], puede ser determinado mediante la relación (Yasunaka, 1994):

$$J_{IC} = \frac{(1-\nu^2)}{E} (K_{IC})^2 \quad (7)$$

donde:

J_{IC} es el valor crítico de la Integral J. El valor correspondiente reportado para el Esfuerzo de Fluencia fue de 548 MPa. Respecto al valor de K_{IC} registrado en el presente trabajo para la misma condición [268,75 MPa (m)^{1/2}, (tabla 3)], el mismo resultó menor en apenas 13,74 MPa (m)^{1/2}, lo cual es aceptable para los altos niveles de Tenacidad de Fractura de este material.

En la literatura no se han encontrado datos equivalentes de naturaleza experimental para pequeños tiempos de envejecimiento en este material. En el presente trabajo, los valores calculados de K_{IC} para tiempos de 1 y 2 h, mostraron una disminución moderada, observándose también un incremento en σ_{ys} , lo cual resulta lógico en el presente contexto del proceso de fragilización que ha experimentado el acero. En relación a los datos que corresponden a 6,5 y 12 h de tratamiento, se observó una tendencia similar [los valores de K_{IC} fueron 217,55 y 214,67 MPa (m)^{1/2}, respectivamente] (tabla 3), en este caso la misma encuentra soporte en los resultados reportados por Johansson y Nilsson (1990), quienes obtuvieron un valor experimental de J_{IC} de 230 kJ/m² [0,230 MPa (m)], siendo el respectivo valor de K_{IC} igual a 222,72 MPa m^{1/2}. Aunque en este último caso el material fue laminado en frío (55% de reducción) y por lo tanto, el endurecimiento obtenido no es de la misma naturaleza que el generado por efecto del tratamiento de envejecimiento, sin embargo, el valor de σ_{ys} que reportan estos autores (795 MPa), está en clara concordancia con los del presente trabajo (784 y 842 Mpa, respectivamente). Para los tiempos de tratamiento comprendidos entre 24 y 120 h,

continúa la tendencia a la disminución de la Tenacidad de Fractura en forma bastante moderada. Aunque no se han encontrado datos en la literatura relativos a la Tenacidad de Fractura del acero SAF 2205 para este último intervalo de tiempos de envejecimiento, sin embargo, la tendencia obtenida parece muy probable, dado que el envejecimiento a 475 °C, debido a la precipitación de la fase α' , puede durar hasta unas 830 h, generándose un deterioro importante del material sólo después de unas 250 h (Wahlberg *et al.* 1988). Transcurrido este tiempo, las propiedades mecánicas más afectadas son la dureza y la tenacidad en general, mientras que el Esfuerzo de Fluencia σ_{ys} , permanece aproximadamente constante y con un valor comprendido entre 1100 y 1150 MPa.

Dimensión Fractal y Tenacidad de Fractura

Como puede observarse en la tabla 3, la irregularidad de las superficies de fractura obtenidas por tensión (y medida directamente a través de la Dimensión Fractal DL), disminuye de forma progresiva con el tiempo de envejecimiento. Simultáneamente como ya se observó, el valor de la Tenacidad de Fractura decrece en forma monótona lo cual es aceptado como un comportamiento natural de los materiales (Hilders *et al.* 1996), dado que una disminución de K_{IC} está asociada a la pérdida de la capacidad para absorber energía, que a su vez está relacionado con la creación de una superficie de fractura menor y menos compleja.

La capacidad que posee la Dimensión Fractal para la medida indirecta de la Tenacidad, puede confirmarse de manera adicional en base a los valores de K_{IC} y DL que se encontraron para 6,5 y 12 h de tratamiento, es decir, para la pequeña variación registrada en K_{IC} respecto a estas dos condiciones (217,55-214,67) MPa (m)^{1/2} = 2,88 MPa (m)^{1/2}, que estadísticamente indica una variación nula de la Tenacidad de Fractura, se encontró que la Dimensión Fractal permaneció constante e igual a 1,11 (tabla 3). En la figura 2 se puede observar el tipo de morfología de fractura que se obtuvo para 4 de las condiciones experimentales estudiadas. Es posible notar en esta figura, que el tamaño de cavidad es cada vez menor, conforme aumenta el tiempo de tratamiento a 475 °C. Los valores referentes al tamaño de cavidad en esta figura, son los obtenidos experimentalmente (Hilders *et al.* 2006): (a) $dT = 12,74 \text{ }\mu\text{m}$ (condición original); (b) $dT = 9,73 \text{ }\mu\text{m}$ (2 h); (c) $dT = 9,03 \text{ }\mu\text{m}$ y (d) $dT = 7,21 \text{ }\mu\text{m}$ (120 h). En los dos primeros casos las cavidades son mayores y más profundas que en los dos últimos, lo que indica una disminución con el tiempo de tratamiento, tanto del área superficial como también de la energía total necesaria para crearla. Aunque se nota un mismo mecanismo de fractura en todos los casos, la pérdida de plasticidad ocasionada

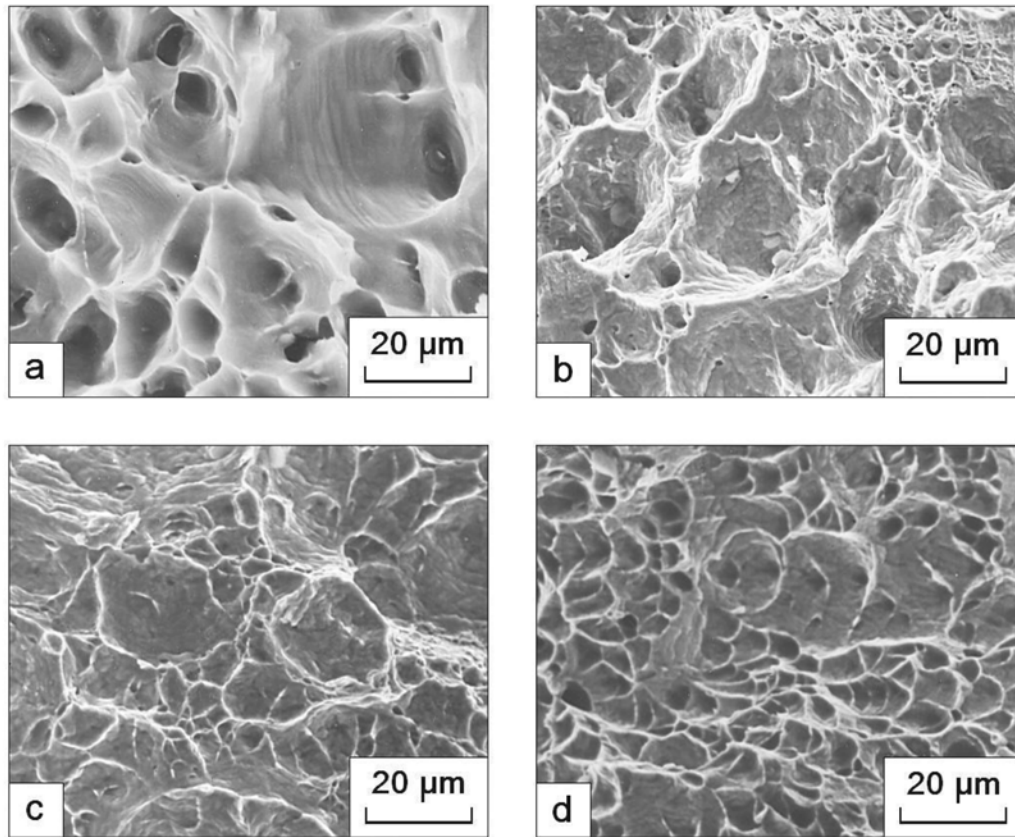


Figura 2. Fractografías correspondientes a cuatro de las condiciones experimentales para el envejecimiento a 475 °C del acero SAF 2205 (MEB). (a) 0 h; (b) 2 h; (c) 24 h y (d) 120 h. (Para detalles ver texto).

por el envejecimiento continuo, determina un desarrollo cada vez más limitado de las cavidades. Es posible que para tiempos mayores de tratamiento, ocurra una transición del mecanismo de fractura dúctil mediante nucleación, crecimiento y coalescencia de cavidades, a otros tipos de mecanismos típicos de aleaciones menos tenaces (por ejemplo: cuasi-clivaje, clivaje etc.), lo cual podría entonces determinar la formación de superficies de fractura más simples.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos y de la respectiva discusión, ha sido posible determinar las siguientes conclusiones:

1. Se observó que tanto el Índice de Tolerancia al Tamaño de Grieta ℓ_c , como la Tenacidad de Fractura K_{IC} , disminuyen de manera progresiva al aumentar el tiempo de envejecimiento a 475 °C.
2. Para los tiempos comprendidos entre 0 y 120 h a 475 °C, los valores de la Tenacidad de Fractura obtenidos a través del modelo de Schwalbe y tomando en cuenta la

naturaleza fractal de las cavidades desarrolladas durante el proceso de fractura, son similares a los encontrados en la literatura.

3. Se encontró que la Dimensión Fractal disminuyó su valor paralelamente a los de ℓ_c y K_{IC} , por lo que puede utilizarse como una medida indirecta de la Tenacidad para el acero bajo estudio.
4. Los valores de la Dimensión Fractal fueron cada vez menores, al descender tanto la plasticidad del acero, como el grado de complejidad de las superficies de fractura con el tiempo de envejecimiento.

Aunque los resultados de esta investigación sugieran un comportamiento lógico de la Tenacidad frente a las condiciones de envejecimiento empleadas, debe tenerse en cuenta que los valores de K_{IC} , y por lo tanto, de ℓ_c , no han sido derivados de procedimientos estándar [dentro de los cuales no se sugiere, en este caso, la aplicación de la NORMA ASTM E399-83 (1989), en razón de las grandes dimensiones necesarias para las probetas respectivas], por lo que sería deseable confirmar los valores encontrados; por ejemplo, a partir de la medición de J_{IC}

[NORMA ASTM E813-88 (1989)].

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela CDCH-UCV por el apoyo financiero otorgado a través del Proyecto PI 08-00-5904-2005.

REFERENCIAS

- BARSOM, J. M. & Rolfe, S. T. (1999). *Fracture and fatigue control of microstructures* 3th Ed. Butterworth-Heinemann, Philadelphia, pp. 120-123.
- BROWN, W. F. & SRAWLEY, J. E. (1970). *Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing*. ASTM STP 463, Philadelphia, pp. 216-225.
- CARPINTERI, A., LACIDOGNA, G. & PUGNO, N. (2007). Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring. *Eng. Fract. Mech.*, 74, pp. 273-289.
- CHIPPERFIELD, G. C. & KNOTT, J. F. (1975). Microstructure and toughness of structural steels. *Metals Tech.*, 2, pp. 45-51.
- CONRAD, H., S. RAGHURAMAN & G. A. SARGENT, (1978): Ductile fracture of Ti-5Al-2.5Sn at low temperatures. In: *Advances in research on the strength and fracture of materials*. Volume 2A, D.M.R. TAPLIN (Ed.). Pergamon Press, New York, pp. 387-393.
- DE VEDIA, L. A., (1986). *Mecánica de fractura*. Proyecto Multinacional de Investigación y Desarrollo en Materiales, OEA-CNEA, Buenos Aires, p. 99.
- HILDERS O. A., N. D. PEÑA & O. A. ROA, (1996): A model to predict the fractal dimension of fracture surfaces of 7075 aluminum alloys based on Koch's fractal curve and mechanical properties. In: *Aluminium alloys their physical and mechanical properties*. Part 3, J.H. DRIVER, B. DUBOST, F. DURAND, R. FOUGERES, P. GUYOT, P. SAINFORT & M. SUERY (Eds.). The Société Française de Métallurgie et de Matériaux, Grenoble, pp. 1485-1490.
- HILDERS O. A., L. SÁENZ, M. RAMOS & N. D. PEÑA, (1999): Effect of 475 °C embrittlement on fractal behavior and tensile properties of a duplex stainless steel. *J. Mater. Eng. Perf.*, 8, pp. 87-90.
- HILDERS O. A., (2001). Fractal characterization of several aluminum alloys. Proceedings of the International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (THERMEC '2000). T. CHANDRA, K. IGASHI, C. SURYANARAYANA & C. TOMÉ (Eds.). Elsevier Science, London, and Special Issue of *J. Mater. Process. Tech.*, (2001); 117/3: CD-ROM Section A4.
- HILDERS O. A., M. RAMOS, N. D. PEÑA & L. SÁENZ, (2006): Fractal geometry of fracture surfaces of a duplex stainless steel. *J. Mater. Sci.* 41, pp. 5739-5742.
- JOHANSSON R. E. & J. O. NILSSON, (1990): Fracture toughness of austenitic and duplex stainless steels. Proceedings of the Nordic Symposium on Mechanical Properties of Stainless Steels. H. NORDBERG & K. FERNHEDEN (Eds.). Swedish Institute for Metals Research, Siguna, pp. 136-154.
- KAMP N., I. SINCLAIR & M. J. STARINK, (2000): Modelling of fracture toughness in high strength 7xxx aluminium alloys. *Mater. Sci. Forum*, pp. 396-402, 1335-1340.
- KHOO H. A., T. M. HRUDEY & J. J. R. CHENG, (2006). Microvoid damage model with material dilation for ductile fracture. *J. Eng. Mech.*, 132, pp. 1067-1076.
- MANDELBROT B. B., D. E. PASSOJA & A. J. PAULLAY, (1984): Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*, 308, pp. 721-722.
- NEVALAINEN M. J., (1997): *The effect of specimen and flaw dimensions on fracture toughness*. Doctor of Technology Thesis, Helsinki University of Technology, p. 37.
- NICODEMI, W., R. ROBERTI & G. M., LA VECCHIA, (1992): Duplex stainless steel microstructure and toughness. In: *Application of stainless steel '92*. Volume 1, H. NORDBERG & J. BJÖRKLUND (Eds.). The Institute of Metals & ASM International, Stockholm, pp. 270-279.
- NORMA ASTM E399-83, (1989): *Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. Volume 03.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

NORMA ASTM E813-88, (1989): *Standard Test Method for JIC, a Measure of Fracture Toughness*. Volume 03.01. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

PARDOEN, T. & J. W. HUTCHINSON, (2000): An extended model for void growth and coalescence. *J. Mech. Phys. Sol.*, 48, pp. 2467-2512.

RAMOS, M., (2004): *Dinámica fractal de la formación de superficies de fractura en un acero dúplex*. Tesis MSc, Universidad Central de Venezuela, p. 94.

SCHWALBE, K. H., (1977): On the influence of microstructure on crack propagation mechanisms and fracture toughness of metallic materials. *Eng. Fract. Mech.* 9, pp. 795-832.

THORVALDSSON, T. & J. O. NILSSON, (1990): Some physical properties of stainless steels. Proceedings of the Nordic Symposium on Mechanical Properties of Stainless Steels. H. NORDBERG & K. FERNHEDEN (Eds.). Swedish Institute for Metals Research, Sigtuna, pp. 1-16.

WAHLBERG, G., U. ROLANDER & G. L. DUNLOP, (1988): 475 °C embrittlement of duplex stainless steel. Proceedings of the 8th International Conference on Strength of Metals and Alloys. Volume 3, P. O. KETTUNEN, T. K. LEPISTO & M. E. LEHTONEN (Eds.) Pergamon Press, Oxford, pp. 1263-1271.

WENG K. L., T. H. CHEN & J. R. YANG, (2003): The high-temperature and low-temperature aging embrittlement in a 2205 duplex stainless steel *Bull. of the College of Eng., National Taiwan University*, 89, pp. 45-61.

WIENCEK, K., A. CZARSKI & T. SKOWRONEK, (2001): Fractal characterization of fractured surfaces of a steel containing dispersed Fe₃C carbide phase. *Mater. Character.* 46, pp. 235-238.

YASUNAKA, T., (1994): Dynamic fracture toughness and its evaluation in a heavy-sectioned ferritic nodular cast iron. In: *Special report N° 94-02*, National Research Institute for Metals, Tokyo, pp. 1-16.