

CALIBRACIÓN DEL CRITERIO SED PARA LA ESTIMACIÓN DE CARGAS DE ROTURA DEL ACERO ESTRUCTURAL S275JR CON COMPORTAMIENTO NO-LINEAL

Marcos Sánchez*, Sergio Cicero, Sergio Arrieta

University of Cantabria, LADICIM (Laboratory of Materials Science and Engineering), Spain.

* E-mail: sanchezmam@unican.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta la aplicación del criterio de Densidad de Energía de Deformación (SED, *Strain Energy Density*) para la estimación de las cargas de rotura en materiales con comportamiento no lineal que contienen entallas en U. El criterio SED fue originalmente definido para predecir la rotura en presencia de entallas en materiales con comportamiento elástico-lineal. Sin embargo, la mayoría de los materiales estructurales (ej. aceros ferrítico-perlíticos) son capaces de desarrollar comportamiento no-lineal (ej., elasto-plástico). En este sentido, este trabajo propone extender el uso del criterio SED en materiales que desarrollen plasticidad mediante una adecuada calibración de sus parámetros característicos. Para validar esta metodología se ha empleado el acero estructural S275JR operando tanto en la zona de transición dúctil frágil como en la región frágil y con 6 radios de entalla diferentes (0 mm, 0.15 mm, 0.25 mm, 0.50 mm, 1.0 mm y 2.0 mm). Los resultados obtenidos demuestran que la calibración propuesta del criterio SED permite predecir con precisión las cargas de rotura. Por lo tanto, se demuestra que es posible extrapolar el criterio SED para obtener estimaciones de carga de rotura en materiales con entallas en U que presenten un comportamiento dúctil.

PALABRAS CLAVE: Fractura, Entalla, Densidad de Energía de Deformación, Aceros Estructurales

ABSTRACT

This paper presents the application of the Strain Energy Density (SED) criterion for the estimation of critical loads in U-notched materials with non-linear behavior. The SED criterion was originally defined to predict failure in the presence of notches in materials with linear-elastic behavior. However, most structural materials (e.g. ferritic-pearlitic steels) are able to develop non-linear behavior (e.g., elastic-plastic). In this sense, this work proposes to extend the use of the SED criterion in materials that develop some plasticity by calibrating adequately their characteristic parameters. To validate this methodology, structural steel S275JR operating both in the brittle ductile transition zone and the lower shelf has been used, containing 6 different notch radii (0 mm, 0.15 mm, 0.25 mm, 0.50 mm, 1.0 mm and 2.0 mm). The results obtained show that the proposed calibration of the SED criterion allows accurate predictions of the critical loads to be obtained. Therefore, it has been shown that it is possible to extrapolate the SED criterion to provide estimates of critical loads in U-notch materials that show ductile behavior.

KEYWORDS: Fracture, Notch, Strain Energy Density, Structural Steels

1. INTRODUCCIÓN

Los componentes entallados presentan una mayor resistencia a la fractura en comparación con los componentes fisurados, tal como demuestra la literatura [1–3]. Este fenómeno afecta directamente a la capacidad de carga de los componentes estructurales. El desarrollo de metodologías adecuadas para la evaluación de la integridad estructural de elementos con este tipo de defectos o detalles reduciría en gran medida el conservadurismo propio de este tipo de procedimientos de evaluación, donde se suelen asimilar las entallas a defectos tipo fisura.

La comunidad científica ha desarrollado teorías y herramientas para comprender y analizar mejor este

fenómeno. No obstante, la fractura frágil sigue siendo motivo de preocupación en diversas situaciones prácticas. Por ejemplo, la fractura por clivaje de las vasijas de los reactores es uno de aspectos más preocupantes debido a que supone la primera barrera de seguridad que poseen las centrales nucleares [4]. La fractura por clivaje puede producirse en los aceros estructurales cuando, por ejemplo, operan a bajas temperaturas ya sean propias del régimen frágil (lower shelf, LS) o en la Zona de Transición Dúctil-Frágil (DBTZ). Aunque los componentes estructurales fabricados con aceros estructurales se diseñan generalmente para trabajar a temperaturas pertenecientes al régimen dúctil (upper shelf, US), garantizando un comportamiento dúctil del material antes del fallo, bajas temperaturas de trabajo inesperadas o fragilización del

material pueden forzar al material a operar en la DBTZ o en el LS. En ambos casos, pero sobre todo en este último, la tenacidad a la fractura del material y la correspondiente capacidad de carga del componente estructural pueden reducirse significativamente. Con todo ello, es crucial desde el punto de vista de la integridad estructural el estudio de aceros que operan a bajas temperaturas.

Por otro lado, para analizar el comportamiento a fractura de materiales entallados se pueden emplear distintos criterios. Dentro de los criterios locales pueden destacarse serían la Teoría de las Distancias Críticas (TDC) [1] y el criterio de densidad de energía de deformación (SED) [5], por ser de los más aceptados y aplicados.

El potencial del criterio SED para abordar problemas de ingeniería está ampliamente explicado y validado [6]. Sin embargo, el criterio SED está basado en un análisis elástico-lineal, por lo que no es posible su aplicación directa en materiales con comportamiento no-lineal. Este propone una calibración del criterio SED que permita predecir la capacidad de carga de materiales con entallas en U que desarrollen plasticidad, incluso a bajas temperaturas.

Con todo ello, la Sección 2 ofrece un breve resumen del criterio de la densidad de energía de deformación (SED), la Sección 3 describe los materiales y métodos, la Sección 4 proporciona las predicciones de carga de fractura obtenidas mediante el uso tanto del criterio SED como del SED calibrado con su correspondiente discusión, y finalmente la Sección 5 recoge las principales conclusiones.

2. EL CRITERIO SED

De acuerdo con el criterio SED [5] las condiciones de rotura se establecen cuando la densidad de energía de deformación media (\bar{W}) en un determinado volumen de control (Ω) en el frente de la entalla alcanza un valor crítico (W_c):

$$\bar{W} = W_c \quad (1)$$

El parámetro de resistencia (W_c) propiedad de cada material siempre y cuando su comportamiento sea elástico lineal. Por lo tanto, W_c puede ser simplemente evaluado a través de la tensión de rotura del material (σ_u) y el módulo de Young (E), ya que se corresponde con el área bajo la curva de un ensayo de tracción:

$$W_c = \frac{\sigma_u^2}{2E} \quad (2)$$

Por otro lado, el volumen de control tiene dos longitudes características (véase Figura 1): r_c , que depende de la

geometría de la entalla y toma el valor $\rho/2$ en el caso de entallas en U; y R_c , que es propiedad del material.

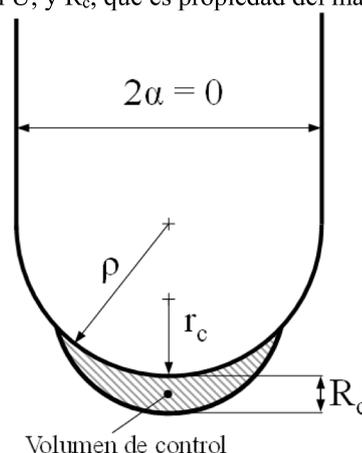


Figura 1. Volumen de control para entallas en U definido para cargas en modo I.

En condiciones de deformación plana, el valor del radio de control, R_c , puede ser derivado a partir del coeficiente de Poisson, ν , la resistencia a fractura del material (K_c) (obtenida mediante probetas fisuradas) y la tensión de rotura:

$$R_c = \frac{(1 + \nu)(5 - 8\nu)}{4\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_u} \right)^2 \quad (3)$$

Cuando dominan las condiciones de tensión plana, la ecuación que define R_c es [7]:

$$R_c = \frac{(5 - 3\nu)}{4\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_u} \right)^2 \quad (4)$$

Las condiciones de deformación plana son dominantes siempre que la resistencia a fractura sea menor que la definida por la ecuación [1]:

$$K_c = \sigma_y \left(\frac{B}{2.5} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

mientras que las condiciones de tensión plana se alcanzan cuando la resistencia a fractura es mayor que el valor definido por la ecuación [1]:

$$K_c = \sigma_y (\pi B)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

donde σ_y es el límite elástico del material y B es el espesor de la probeta. Aquellas situaciones comprendidas entre las condiciones de tensión y deformación planas requieren una interpolación entre las ecuaciones (3) y (4) para definir R_c . Finalmente, la densidad de energía de deformación media (comprendida dentro de R_c) puede

ser evaluada directamente a través de la siguiente expresión analítica:

$$\bar{W} = F(2\alpha) \cdot H \left(2\alpha, \frac{R_c}{\rho} \right) \cdot \frac{\sigma_{\max}^2}{E} \quad (7)$$

donde $F(2\alpha)$ depende del ángulo de apertura y toma el valor de 0.785 para entallas en U, $H(2\alpha, R_c/\rho)$ depende del ángulo de apertura y de la relación entre R_c y el radio de entalla ρ , y σ_{\max} es la máxima tensión elástica en el fondo de la entalla. En la Tabla 1 se recogen valores tabulados de H para diferentes geometrías de entalla que fueron obtenidos originalmente mediante análisis numérico.

Tabla 1. Valores de H para entallas en U ($2\alpha=0$) [6].

R_c/ρ	$\nu = 0.25$	$\nu = 0.30$	$\nu = 0.35$	$\nu = 0.40$
0.01	0.5813	0.5638	0.5432	0.5194
0.05	0.5258	0.5086	0.4884	0.4652
0.1	0.4687	0.4518	0.4322	0.4099
0.3	0.3216	0.3069	0.2902	0.2713
0.5	0.2401	0.2276	0.2135	0.1976
1	0.1399	0.1314	0.1217	0.1110

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La validación del SED mediante la calibración de sus parámetros característicos (W_c y R_c), ha sido particularizada al acero estructural S275JR. Este acero ferrítico-perlítico, que fue suministrado en forma de chapa laminada, ha sido previamente estudiado en distintos trabajos [2], [3], en los cuales se llevó a cabo un extenso programa experimental en donde se caracterizaron tanto las propiedades a tracción y a fractura (0 mm, 0.15 mm, 0.25 mm, 0.50 mm, 1.0 mm y 2.0 mm) a cinco temperaturas distintas, cubriendo tanto la DBTZ como el LS del material. La Tabla 2 resume las principales propiedades mecánicas para las diferentes temperaturas consideradas. En la Figura 2 se muestran ejemplos de ensayos de tracción de las cinco temperaturas estudiadas. Como se puede observar, pese a las bajas temperaturas el acero S275JR sigue manteniendo un comportamiento dúctil a tracción.

Tabla 2. Principales propiedades mecánicas del acero estudiado [2], [3].

Temp. (°C)	E (GPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	K_c (MPa√m)
-10	207	337	536	123
-30	208	344	548	101

-50	209	349	564	81
-90	211	380	597	63
-120	213	398	614	49

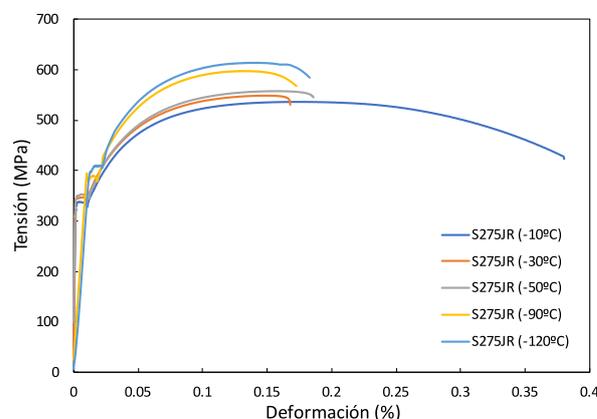


Figura 2. Ejemplos de curvas tensión-deformación obtenidas en las distintas temperaturas estudiadas.

3.1. Aplicación directa del criterio SED

Una vez determinadas las propiedades mecánicas básicas a partir de los resultados de tracción y fractura de cada material, se predijeron las cargas de rotura mediante la aplicación del criterio SED según su formulación original, es decir, asumiendo un comportamiento elástico lineal del material. El procedimiento seguido fue el siguiente, a partir del criterio de fallo establecido por el SED y siguiendo las ecuaciones (1), (2) y (7), la tensión máxima en el frente de la entalla puede derivarse sencillamente a partir de los valores tabulados de la función H y las propiedades mecánicas del material:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{W_c \cdot E}{0.785 \cdot H \left(2\alpha, \frac{R_c}{\rho} \right)}} \quad (8)$$

En este punto es necesario tener en cuenta que los valores de H presentados en la tabla 1 han sido tabulados para un rango de R_c/ρ determinado (de 0.01 hasta 1). Sin embargo, hay materiales donde la relación R_c/ρ alcanza valores mucho mayores, por ejemplo, el acero S275JR empleado en este trabajo supera el valor de 100 a -10°C . Por lo tanto, para cada material analizado, los valores tabulados de H deberían ser extrapolados para cada valor de poisson. En este trabajo se ha usado el ajuste mostrado en la ecuación (9), propuesto en [8].

$$H = \frac{a}{\frac{R_c}{\rho} + b} \quad (9)$$

donde los valores de a y b son los parámetros necesarios para el ajuste de la curva. En el caso del acero de este estudio, se ajustó la curva por el método de mínimos

cuadrados para un coeficiente de poisson de 0.3, resultando en unos parámetros de ajuste de 0.1896 y 0.3258 para a y b, respectivamente, como que se muestra en la Figura 3.

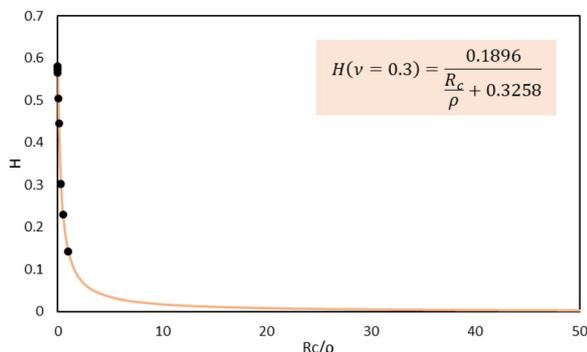


Figura 3. Valores tabulados de H extrapolados para $\nu=0.3$.

A continuación, considerando que σ_{max} (en el modo I) se alcanza en el fondo de la entalla ($r = 0$), y aplicando la distribución de tensiones de la entalla en U propuesta por Creager-Paris, el factor de intensidad de la tensión (K_I) puede derivarse directamente de la siguiente ecuación:

$$\sigma(r = 0) = \sigma_{max} = \frac{2K_I}{\sqrt{\pi\rho}} \quad (10)$$

Finalmente, pueden utilizarse alguna de las soluciones analíticas de K_I para probetas comunes que pueden encontrarse en bibliografía para derivar los valores críticos de carga predichas siguiendo el criterio SED (P_{SED}). Para este trabajo se ha utilizado la ecuación (11) para probetas de fractura de tensión compacta (CT).

$$K_I = \left(\frac{P_{SED}}{B\sqrt{W}}\right) 6 \left(\frac{a}{W}\right)^{0.5} \left(\frac{1.99\left(\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)\left(2.15-3.93\left(\frac{a}{W}\right)+2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right)}{\left(1+2\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)^{1.5}}\right) \quad (11)$$

siendo a, la longitud del defecto (25 mm para las probetas entalladas), B, el espesor de la probeta (25 mm) y W, la anchura de la probeta (50 mm).

3.2. Calibración del criterio SED

Como se ha mencionado anteriormente, el SED es un criterio local basado en principios elástico-lineales. En materiales que desarrollan plasticidad establecer como valor crítico de rotura el área bajo la curva de un material perfectamente elástico lineal (W_c) puede conllevar a predicciones excesivamente conservadoras. Hasta ahora, se han llevado a cabo distintos intentos para extender la aplicabilidad del criterio SED a materiales con comportamiento no-lineal mediante la combinación con otras herramientas, como, por ejemplo, el concepto del material equivalente (EMC) [9].

En el presente trabajo se propone realizar una calibración de los parámetros característicos del SED de manera similar a la utilizada en el método del punto (PM), propia de la TDC [1].

El PM permite calibrar los parámetros de la TDC mediante la intersección de dos perfiles tensionales calculados en el fondo de dos entallas de distinto radio. Extrapolándolo al criterio SED, se pueden obtener un perfil de densidad de energía de deformación (W) en función de la distancia al fondo de entalla (R). De esta manera obteniendo dos perfiles W para dos radios de entalla distintos se pueden calibrar los valores W_{cal} y R_{cal} , tal como se muestra en la Figura 4. Una vez definido los parámetros calibrados, las predicciones de carga de fractura (P_{SED} calibrado) para cualquier otro radio de entalla puede derivarse fácilmente siguiendo el procedimiento SED convencional expuesto en el apartado 3.1. Por lo tanto, con tan solo dos probetas de dos radios de entalla distintos sería posible predecir las cargas de rotura para entallas en U de distinto radio.

Para este trabajo, la calibración se ha llevado a cabo a partir de los datos experimentales de probetas con el menor y el mayor radio de entalla, es decir 0.15 y 2 mm, para las cinco temperaturas estudiadas. La curva W se ha calculado en función de R a partir de las cargas de rotura experimentales. Para ello, se calcula K_I con la ecuación (11) y se obtiene la σ_{max} mediante Creager-Paris, ecuación (10). Finalmente se calcula W para utilizando la ecuación (7). Con todo ello se obtienen las curvas W para los dos radios de entalla utilizados, como por ejemplo se muestra en la Figura 2. Como se puede observar en el ejemplo de la figura, el valor calibrado W dista del valor constante utilizado por el procedimiento original, la línea gris.

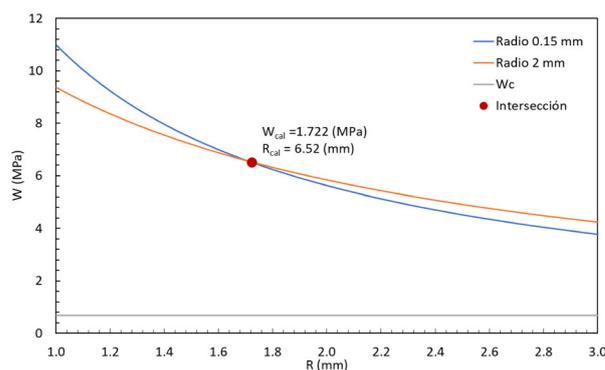


Figura 4. Calibración de los parámetros W y R_c para la temperatura $-10^\circ C$.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las cargas de rotura han sido estimadas utilizando el criterio SED directamente y con la calibración propuesta en el apartado con el fin de comparar los resultados obtenidos con cada uno y las diferencias entre ellos.

Los parámetros calibrados para cada temperatura se recogen en la Tabla 3, mientras la Tabla 4 recoge las cargas de rotura medias para cada radio de entalla y temperatura junto a las predicciones de carga del criterio SED y SED calibrado.

Tabla 2. Parámetros SED calibrados para cada temperatura.

	Temperatura (°C)				
	-10	-30	-50	-90	-120
W_{cal} (MPa)	6.52	9.19	11.47	11.31	10.80
R_{cal} (mm)	1.722	1.151	0.857	0.695	0.548

Tabla 3. Promedio de cargas de rotura obtenidas tanto experimentalmente como calculados mediante el criterio SED y el SED calibrado.

Temp. (°C)	ρ (mm)	P_{EXP} (kN)	P_{SED} (kN)	$P_{SED, calibrado}$ (kN)
-10	0.15	65.04	65.04	65.04
	0.25	65.80	65.63	65.10
	0.50	69.85	67.10	65.25
	1.00	72.63	69.94	65.56
	2.00	75.30	75.30	66.17
-30	0.15	63.73	63.74	63.73
	0.25	61.98	64.60	63.82
	0.50	68.52	66.70	64.05
	1.00	72.50	70.71	64.52
	2.00	78.11	78.12	65.44
-50	0.15	62.00	62.02	62.00
	0.25	56.52	63.13	62.14
	0.50	65.48	65.81	62.51
	1.00	65.53	70.87	63.23
	2.00	80.02	80.04	64.66
-90	0.15	56.05	56.06	72.74
	0.25	57.00	57.28	72.80
	0.50	59.93	60.21	72.96
	1.00	69.63	65.67	73.26
	2.00	75.43	75.43	73.86
-120	0.15	49.28	49.30	73.99
	0.25	50.96	50.63	74.07
	0.50	59.17	53.80	74.26
	1.00	64.38	59.65	74.64
	2.00	69.88	69.89	75.41

En la Figuras 5 y 6 se muestran las estimaciones de la carga de rotura obtenidas usando el criterio SED y el SED calibrado, respectivamente. Se puede observar que las predicciones de las cargas de rotura obtenidas con el criterio SED son, en general, menores que las cargas de rotura experimentales, obteniendo resultados claramente conservadores. Estos resultados están relacionados con el uso de una formulación elástico-lineal en una situación real claramente elasto-plástica. Por tanto, las estimaciones de los valores críticos de W_c no son valores representativos para materiales que exhiben grandes deformaciones plásticas antes del fallo.

Por otro lado, se puede observar cómo utilizando los valores calibrados del SED las predicciones de carga mejoran significativamente, encontrándose todas dentro

de un margen de error del $\pm 20\%$. El máximo error es del 12% para la temperatura -30°C y radio 0.25 mm, siendo el promedio de error de todas las predicciones inferior al 3%. Por lo que queda demostrado la capacidad de predecir de forma precisa con esta calibración

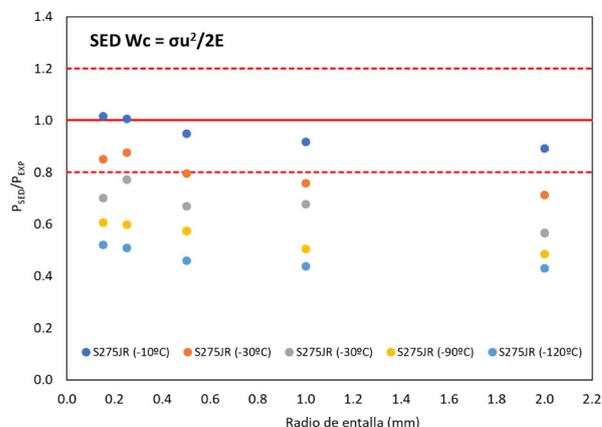


Figura 5. Comparación entre las predicciones de las cargas de rotura (criterio SED) y las cargas de rotura experimentales.

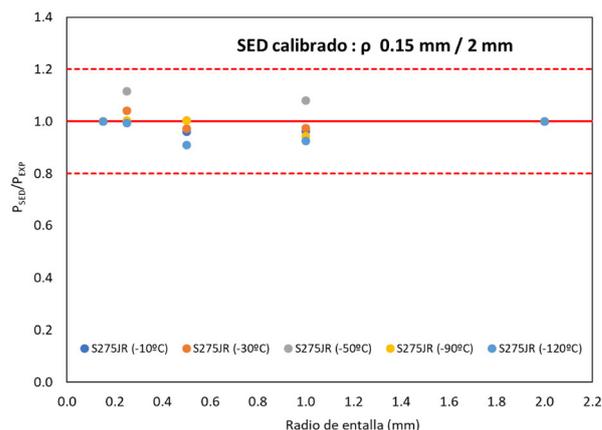


Figura 6. Comparación entre las predicciones de las cargas de rotura (criterio SED calibrado) y las cargas de rotura experimentales.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se evalúa la posibilidad de extrapolar el criterio SED para el cálculo de cargas de rotura en materiales entallados que presentan una plasticidad importante. Para ello, se ha analizado el acero estructural S275JR a cinco temperaturas ($-10, -30, -50, -90$ y -120°C) y con seis radios de entalla diferentes (0, 0.15, 0.25, 0.50, 1.0 y 2.0 mm).

En vez de predecir los valores de carga a través del SED directamente, es decir, utilizando su parámetro característico W_c y asumiendo un comportamiento elástico-lineal, se han calibrado los parámetros característicos W_{cal} y R_{cal} , a partir de dos radios de entalla distintos (0.15 y 2 mm en este caso). Los resultados obtenidos demuestran que con una sencilla calibración

del criterio SED se consiguen predicciones de cargas de rotura precisas para materiales que claramente presentan un desarrollo dúctil antes del fallo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean expresar su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación por el apoyo financiero al proyecto MAT2014-58443-P: Análisis del comportamiento en fractura de componentes estructurales con defectos en condiciones debajo confinamiento tensional, en cuyos resultados se basa este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] D. Taylor, *The Theory of Critical Distances*, Elsevier, UK (2007).
- [2] S. Cicero, V. Madrazo, and T. García, Analysis of notch effect in the apparent fracture toughness and the fracture micromechanisms of ferritic–pearlitic steels operating within their lower shelf, *Eng. Fail. Anal.* 36 (2014) 322–342.
- [3] S. Cicero, V. Madrazo, T. García, J. Cuervo, and E. Ruiz, On the notch effect in load bearing capacity, apparent fracture toughness and fracture mechanisms of polymer PMMA, aluminium alloy Al7075-T651 and structural steels S275JR and S355J2, *Eng. Fail. Anal.* 29 (2013) 108–121.
- [4] V. N. Shah and P. E. MacDonald, *Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components*, 1st Edition. Elsevier Science (1993).
- [5] P. Lazzarin and R. Zambardi, A finite-volume-energy based approach to predict the static and fatigue behavior of components with sharp V-shaped notches, *Int. J. Fract.* 112 (2001) 275–298.
- [6] F. Berto, P. Lazzarin, and M. R. Ayatollahi, Recent developments in brittle and quasi-brittle failure assessment of graphite by means of SED approach, *13th International Conference on Fracture 2013*, 2 (2013) 854–861.
- [7] Z. Yosibash, Failure Criteria for Brittle Elastic Materials, *Interdiscip. Appl. Math.* 37 (2012) 185–220.
- [8] J. Justo, J. Castro, and S. Cicero, Energy-based approach for fracture assessment of several rocks containing U-shaped notches through the application of the SED criterion, *Int. J. Rock Mech. Min.*, 110 (2018) 306–315.
- [9] J. D. Fuentes, S. Cicero, F. Berto, A. R. Torabi, V. Madrazo, and P. Azizi, Estimation of fracture loads in AL7075-T651 notched specimens using the equivalent material concept combined with the strain energy density criterion and with the theory of critical distances, *Metals*, 8 (2018) 87.