

UN PROCEDIMIENTO BÁSICO DE EVALUACIÓN DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE COMPONENTES ENTALLADOS

S. Cicero^{1*}, V. Madrazo², T. García³

¹ Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, Av/ Los Castros s/n, 39005, Santander, Cantabria, España.

² Fundación Centro Tecnológico de Componentes (CTC), Parque Científico y Tecnológico de Cantabria (PCTCAN), C/ Isabel Torres nº 1, 39011, Santander, España.

³IDOM, Servicios Nucleares, Av/ Zarandoa Etorbidea, Bilbao, Bizkaia, España.

*E-mail: ciceros@unican.es

RESUMEN

Este trabajo presenta un procedimiento básico de evaluación de integridad estructural de componentes entallados basado en los trabajos realizados por los autores en los últimos 5 años, en los cuales se ha analizado el efecto entalla en materiales tan diversos como el PMMA, la Al7075-T651, rocas como el granito y la caliza y diversos aceros estructurales (S275JR, S355J2, S460M y S690Q). En todos ellos el marco teórico de trabajo ha sido la denominada Teoría de las Distancias Críticas. El procedimiento propuesto combina las correcciones por efecto entalla de dicha teoría con un Diagrama de Fallo básico, único para todos los materiales, y queda validado por su aplicación a 232 ensayos de fractura realizados sobre probetas entalladas.

ABSTRACT

This paper presents a basic procedure for the integrity assessment of structural components containing notches. It is based on the works developed by the authors in the last five years analysing the notch effect in a wide range of materials, including PMMA, Al7075-T651, rocks such as granite and limestone and four structural steels (S275JR, S355J2, S460M and S690Q). In all cases the theoretical framework has been the Theory of Critical Distances. The procedure combines the notch effect corrections provided by such theory with a basic Failure Assessment Diagram, and has been successfully validated through its application to 232 fracture tests performed on notched specimens.

PALABRAS CLAVE: efecto entalla, integridad estructural, Diagrama de Fallo, Método de la Línea.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Efecto entalla

Los componentes con entallas desarrollan generalmente una mayor capacidad resistente que la que observada cuando se encuentran fisurados (ej., [1-10]). Con todo, es una práctica frecuente en ingeniería analizar las entallas como si fueran fisuras, dando como resultado análisis que generalmente son excesivamente conservadores. Las consecuencias prácticas pueden ser, por ejemplo, la realización de reparaciones o sustituciones de elementos estructurales que son innecesarias desde el punto de vista de la integridad estructural.

En un fallo frágil debido a la presencia de una fisura, la mecánica de la fractura establece que la situación crítica se alcanza cuando la tensión remota (σ^c) aplicada multiplicada por la raíz cuadrada de la longitud de fisura (a) es igual a una constante [11]:

$$\sigma^c \sqrt{a} = cte_1 \quad (1)$$

Por su parte, las entallas someten a los componentes estructurales a situaciones tensionales menos críticas, de tal manera que la ecuación (1) pasa a ser:

$$\sigma^c a^\alpha = cte_2 \quad (2)$$

en donde α es una constante. Por lo tanto, la particular naturaleza de las entallas hace necesario desarrollar metodologías específicas para su análisis a fractura que tengan en cuenta sus menores exigencias tensionales.

1.2. La Teoría de las Distancias Críticas

La Teoría de las Distancias Críticas (TDC) es en realidad un conjunto de metodologías que tienen en común el hecho de que en las evaluaciones de fractura utilizan, junto a la tenacidad a fractura, un parámetro característico del material con unidades de longitud (la distancia crítica, L) [1,2]. Los orígenes de la TDC se localizan a mediados del siglo XX con los trabajos de Neuber [3] y Peterson [4], pero su mayor desarrollo se ha producido en la última década, estableciendo su aplicabilidad a diferentes tipos de materiales (ej., metales, cerámicos, polímeros y compuestos), procesos

(principalmente fractura y fatiga) y condiciones (ej., elástico-lineal frente elastoplástico). El parámetro de longitud mencionado anteriormente es normalmente conocido como L (distancia crítica), y su expresión (en análisis de fractura) es:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3)$$

Donde K_{mat} es la tenacidad a fractura del material y σ_0 es un parámetro resistente característico del material (denominado generalmente tensión inherente), que suele ser mayor que la tensión de rotura del material (σ_u) y que debe ser calibrado. Únicamente en aquellas condiciones en las cuales se produce comportamiento elástico-lineal tanto a escala macroscópica como microscópica (ej., fractura en materiales cerámicos) σ_0 coincide con σ_u .

Entra las metodologías que conforman la TCD, el Método del Punto (PM) y el Método de la Línea (LM) destacan por su sencillez [1]:

- El Método del Punto (PM, *Point Method*): es la aproximación más sencilla, y asume que el fallo se produce cuando la tensión alcanza el valor de la tensión inherente (σ_0) a una determinada distancia del frente de la entalla, igual a $L/2$. Así resulta que el criterio de fallo es:

$$\sigma\left(\frac{L}{2}\right) = \sigma_0 \quad (4)$$

- El Método de la Línea (LM, *Line Method*): supone que el fallo se produce cuando la tensión media a lo largo de una longitud determinada, que resulta ser $2L$, alcanza el valor de la tensión inherente, σ_0 . Por lo tanto, la expresión del LM es:

$$\frac{1}{2L} \int_0^{2L} \sigma(r) dr = \sigma_0 \quad (5)$$

Las predicciones usando el LM difieren ligeramente de las que se obtienen al usar el PM [7], pero ambos métodos generan resultados razonablemente parecidos a los datos obtenidos experimentalmente [1].

Las diferentes metodologías de la TDC se pueden aplicar para generar predicciones de la tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) que presentan los componentes entallados [1]. Si se utiliza el PM es necesario considerar la distribución de tensiones en el fondo de entalla propuesto por Creager and Paris [5] (entallas en U), que es la existente en el fondo de fisura pero desplazada una distancia igual a la mitad del radio de entalla:

$$\sigma(r) = \frac{K_I}{\sqrt{\pi}} \frac{2(r + \rho)}{(2r + \rho)^{3/2}} \quad (6)$$

Considerando esta distribución tensional, las condiciones de rotura del PM (ecuación (4)) y la definición de la distancia crítica L (ecuación (3)), y estableciendo que el fallo se produce cuando K_I es igual a K_{mat}^N , se obtiene fácilmente la siguiente ecuación [1]:

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

Análogamente, la aplicación del LM proporciona la ecuación (8), la cual, por su sencillez, va a ser la utilizada en este trabajo (el uso de otras expresiones sería totalmente análogo).

$$K_{mat}^N = K_{mat} \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L}} \quad (8)$$

1.3. Diagramas de Fallo

Los Diagramas de Fallo o FADs (*Failure Assessment Diagrams*) se utilizan para evaluar la integridad estructural de componentes con fisuras, y son aplicable a situaciones que van desde situaciones frágiles hasta aquellas en las que se produce plastificación generalizada (ej., [6,7]). Estos diagramas tienen en cuenta la interacción entre fractura y colapso plástico. Para ello se necesita una relación entre los parámetros que evalúan ambos procesos, denominados K_r y L_r , respectivamente:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (9)$$

$$L_r = \frac{P}{P_L} \quad (10)$$

K_I el factor de intensidad de tensiones, K_{mat} la tenacidad a fractura del material, P es la carga aplicada y P_L es la carga de colapso plástico. La relación entre ambos parámetros debe, además, representar una situación crítica, distinguir entre situaciones aceptables y no aceptables. La situación del componente evaluado frente a la rotura se obtiene mediante un punto de coordenadas (K_r , L_r) y su situación con respecto a la correspondiente línea de fallo, FAL (*“Failure Assessment Line”*). La Figura 1 muestra un ejemplo con las tres situaciones posibles: si el punto queda entre la FAL y los ejes coordenados se considera aceptable (A), si queda por encima de la FAL se considera que el

componente falla (C) y si el punto queda justo encima de la FAL se cumple la condición de rotura (B).

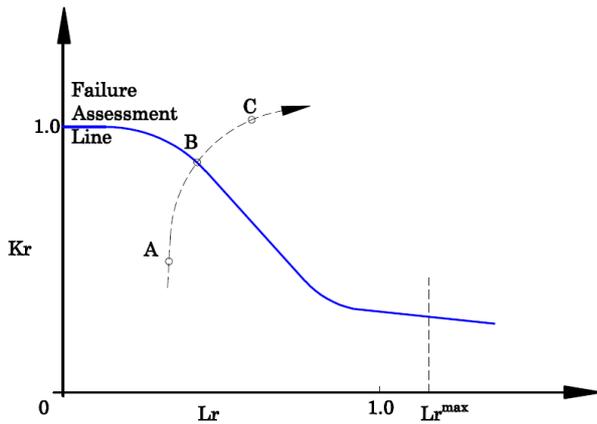


Figura 1. Análisis FAD con las 3 situaciones posibles: A, situación segura; B, situación crítica (rotura); C, situación inaceptable.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los autores han publicado recientemente diversos artículos que aplican la TDC, particularmente el PM y el LM, a diferentes tipos de materiales: PMMA [8], Al7075-T651 [9], aceros estructurales (e.g., [10,11]) y rocas [12]. La capacidad del LM para predecir el efecto entalla queda recogida en [13]. Este artículo recoge las predicciones para un buen número de casos (232 ensayos), pudiéndose encontrar los detalles de los procedimientos experimentales en las citadas referencias. La Tabla 1 recoge una breve descripción de los ensayos realizados, mientras que la Figura 2 muestra las correspondientes predicciones del LM.

Tabla 1. Resumen y descripción de los ensayos analizados. LS: Lower Shelf; DBTZ: Ductile-to-Brittle Transition Zone.

Material	Nº ensayos	Radio entalla (mm)
PMMA	32	0-2.5
Al7075-T651 LT	23	0-2.0
Granite	41	0-10
Limestone	41	0-10
S275JR (-120°C, LS)	23	0-2.0
S355J2 (-196°C, LS)	24	0-2.0
S460M (-120°C, DBTZ)	24	0-2.0
S690Q (-120°C, DBTZ)	24	0-2.0

Puede observarse (Figura 2) que el LM captura la física del efecto entalla, dado que sus predicciones de efecto entalla siguen adecuadamente la tendencia de los resultados experimentales. La ecuación (8) puede expresarse de una forma más general:

$$K_{mat}^N = K_{mat} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{M}\right) \left(\frac{\rho}{L}\right)} \quad (11)$$

donde M es un coeficiente que puede ser ajustado experimentalmente y cuyo valor teórico (ecuación (8)) es 4. En este sentido, si se utiliza el LM en evaluaciones de integridad estructural, aunque la ecuación (8) captura adecuadamente el efecto entalla su uso puede resultar inseguro, dado que aproximadamente la mitad de los resultados experimentales quedan por debajo de sus predicciones de tenacidad aparente a fractura. Para evitar esto es necesario hacer uso de una expresión que genere predicciones seguras de tenacidad aparente, proponiéndose aquí hacer uso de la ecuación (11) con un valor de M igual a 20 (ver Figura 2).

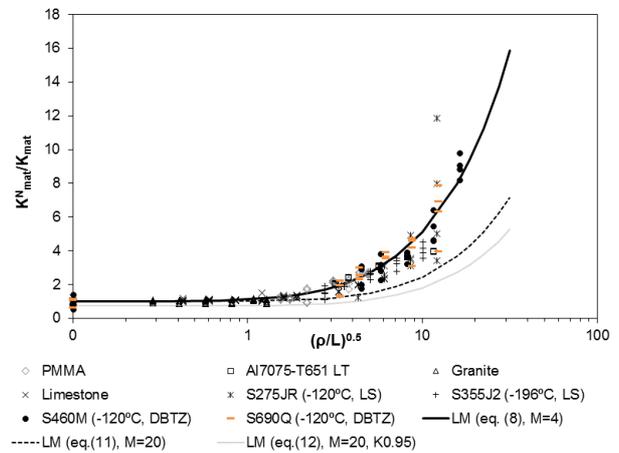


Figura 2. Predicciones del LM para los distintos materiales analizados.

Más aún, con el objetivo de capturar la dispersión obtenida en las probetas fisuradas, en [13] se consideró una distribución normal de los resultados de K_{mat}^N/K_{mat} obtenidos en numerosos resultados experimentales, obteniéndose una desviación típica de 0.1616. Esto, cuando se considera un nivel de confianza del 95%, da lugar a un valor de cálculo de K_{mat}^N/K_{mat} en condiciones fisuradas igual a 0.73 (la media, 1.0, menos 1.645 veces la desviación típica). Las correspondientes predicciones de tenacidad aparente se muestran igualmente en la Figura 2, y siguen la ecuación (12):

$$K_{mat}^N = 0.73 \cdot K_{mat} \sqrt{1 + \frac{1}{20} \left(\frac{\rho}{L}\right)} \quad (12)$$

Con todo esto, el procedimiento básico de evaluación de integridad estructural de componentes entallados propuesto en este trabajo combina las correcciones del LM con la metodología FAD [14-16], introduciendo la corrección por entalla en el parámetro K_r del FAD. La

definición de este parámetro resulta, en caso de usar la corrección de entalla de la ecuación (8):

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}^N} = \frac{K_I}{K_{mat} \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L}}} \quad (13)$$

Por lo tanto, la ecuación (13) sustituye a la ecuación (9) cuando los defectos analizados son entallas (en U) en vez de fisuras. Además, siguiendo la práctica ingenieril, el valor de K_{mat} utilizado para cada material debe ser aquel que proporciona un determinado nivel de confianza (ej., 95%). Expresiones análogas podrían derivarse para otro tipo de entallas (ej., en V), siempre y cuando se utilicen los campos de tensiones adecuados para derivar expresiones análogas a (8) y (13).

Con respecto a la definición del parámetro L_r , dependiente de la carga de colapso plástico (ecuación (10), [17] demuestra la baja influencia del radio de entalla en la misma. Por lo tanto, la definición de L_r propuesta es la misma que la usada en el análisis de fisuras.

Finalmente, la última cuestión a definir para completar el análisis FAD es la propia FAL. Horn y Sherry han demostrado una dependencia muy débil del FAD correspondiente a la Option 3 del R6 con respecto al radio de entalla [18,19]. Por lo tanto, el análisis de entallas propuesto hace uso de las mismas FAL utilizadas en el análisis de fisuras. Además, con el objetivo de tener una representación homogénea de los 232 ensayos analizados en este trabajo, es necesario hacer uso de una FAL que no dependa del material analizado. De esta manera se propone el uso de la FITNET FFS Option 0 (*discontinuous yielding*) [6], que constituye una versión conservadora de la BS7910 Option 1 [20]. Su definición es la siguiente:

$$f(L_r) = [1 + 0.5(L_r)^2]^{-1/2} \quad L_r \leq 1 \quad (14)$$

$$f(L_r) = 0 \quad L_r > 1 \quad (15)$$

Tal y como se ha mencionado previamente, las predicciones del LM capturan la física del efecto entalla, pero generan predicciones inseguras en, aproximadamente, la mitad de los resultados analizados. Por este motivo, y teniendo en cuenta la ecuación (12), se propone la siguiente ecuación adicional para la realización de una evaluación básica, rápida y conservadora de la integridad estructural de componentes con entallas en U

$$K_r = \frac{K_I}{0.73 K_{mat} \sqrt{1 + \frac{\rho}{20L}}} \quad (16)$$

En este caso el valor de K_{mat} a utilizar ha de ser el correspondiente a la media de los resultados obtenidos en cada material en condiciones fisuradas, dado que la dispersión experimental de la resistencia a fractura queda recogida en el factor “0.73”.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figuras 3 a 5 muestran los resultados obtenidos (puntos de evaluación en el momento del fallo) cuando se aplica la metodología propuesta en este trabajo. La Figura 3 se corresponde con evaluaciones sin corrección por efecto entalla; la Figura 4 utiliza la ecuación (13) para la definición de K_r ; finalmente, la Figura 5 hace uso de la ecuación (16) en la definición de K_r . En los tres casos la FAL sigue las ecuaciones (14) y (15), y L_r sigue la ecuación (10). Las soluciones de K_I y P_L se han tomado de [21] y [7], respectivamente.

Puede observarse en la Figura 3 cómo los puntos de evaluación, correspondientes al fallo de las distintas probetas, se encuentran frecuentemente muy alejados de la condición teórica de fallo establecida por la FAL. Esto significa que las predicciones de carga crítica derivadas del análisis FAD son muy inferiores a las cargas críticas reales. Esta cuestión es más apreciable a medida que aumenta el radio de entalla, de manera que cuanto mayor sea dicho radio más alejado se encuentra el punto de evaluación correspondiente con respecto a la FAL. Estos resultados revelan un alto grado de conservadurismo cuando se evalúan entallas como si fuesen fisuras, y justifican la necesidad de desarrollar métodos de evaluación de entallas que tengan en cuenta la propia naturaleza de las mismas. Los factores de seguridad observados en este caso [6] tienen valores típicos de 2.5, con máximos en torno a 5.

La Figura 4 muestra una clara reducción del conservadurismo del análisis, con puntos de evaluación en el momento del fallo mucho más próximos a la FAL. Los factores de seguridad tienen un valor medio aproximado de 1.3, con valores máximos en torno a 3. Puede observarse igualmente que hay 6 puntos situados en la zona segura del FAD (entre la FAL y los ejes coordenados). Estos puntos se corresponden con evaluaciones inseguras del modelo, y representan un 2.6 % del total de las evaluaciones, lo cual constituye una situación razonable si se tienen en cuenta que se hace uso de un valor de tenacidad a fractura (K_{mat}) correspondiente al 95% de confianza.

Con la intención de reducir la posibilidad de generar resultados del lado de la inseguridad, se ha aplicado también la ecuación (16) para la determinación de K_r , mostrándose los resultados en la Figura 5. Puede observarse que la corrección por entalla sigue generando una notable reducción del conservadurismo: el factor de seguridad medio se sitúa en torno a 1.5, con valores máximos próximos a 3. Las predicciones

generadas por esta corrección son menos precisas que las recogidas en la Figura 4, pero a cambio el número de resultados inseguros se reduce a 2 (0.9 %). Estos dos resultados se corresponden, además, a probetas fisuradas, luego la inseguridad asociada a su evaluación no se puede atribuir a la corrección por efecto entalla.

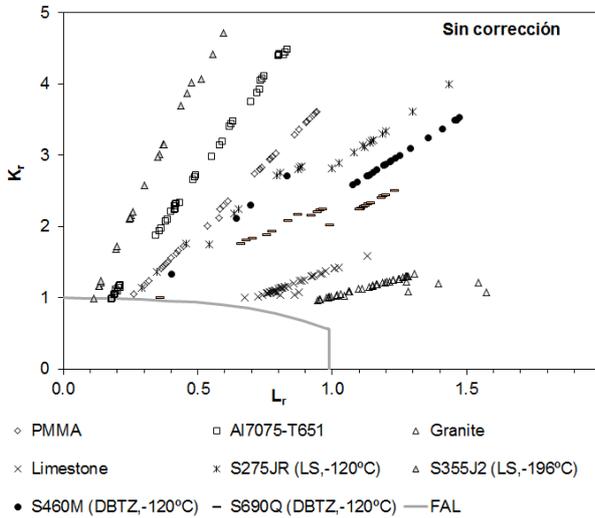


Figura 3. Evaluación en rotura de las probetas ensayadas sin corrección por efecto entalla.

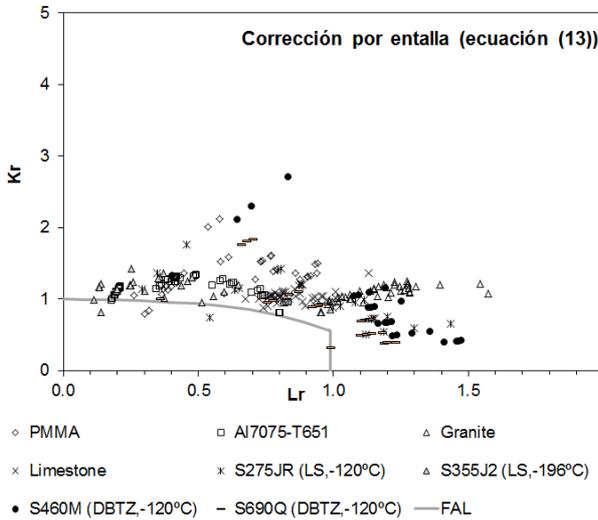


Figura 4. Evaluación en rotura de las probetas ensayadas con corrección por efecto entalla (ecuación (13)).

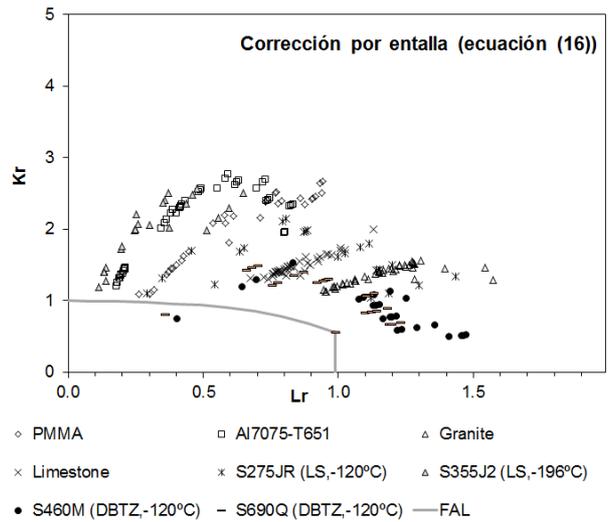


Figura 5. Evaluación en rotura de las probetas ensayadas con corrección por efecto entalla (ecuación (16)).

4. CONCLUSIONES

Este artículo presenta y valida un procedimiento básico de evaluación de integridad estructural de componentes estructurales con entallas (en U) basado en el uso de Diagramas de Fallo y de las correcciones por efecto entalla proporcionadas por el Método de la Línea. La capacidad de este último para predecir el efecto entalla ha sido también demostradas. El procedimiento propuesto limita las correcciones por entalla a la definición del parámetro K_r del FAD (análisis a fractura), manteniendo las definiciones del parámetro L_r y de la Línea de Fallo utilizadas en el análisis de fisuras. Se han utilizado dos correcciones por efecto entalla: la derivada de la aplicación estricta del Método de la Línea (junto con la tenacidad a fractura asociada al 95% de confianza), y una envolvente inferior asociada a una versión del Método de la Línea ajustada experimentalmente.

La metodología ha sido validada mediante su aplicación a 232 resultados experimentales que cubren una amplia variedad de materiales (PMMA, Al7075-T651, caliza, granito, S275JR, S355J2, S460M, S690Q). Los resultados demuestran que las predicciones de rotura obtenidas cuando se aplican las correcciones por efecto entalla se aproximan mucho más a las condiciones teóricas de fallo (definidas por la Línea de Fallo) que las obtenidas cuando las entallas son analizadas como si fuesen fisuras. Por lo tanto, la precisión de las predicciones aumenta considerablemente y el conservadurismo se reduce, si bien en la gran mayoría de los casos los resultados siguen quedando del lado de la seguridad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al MINECO del Gobierno de España la financiación de los proyectos MAT2010-15721 y MAT2014-58443-P, de cuyos resultados se deriva este artículo.

REFERENCIAS

- [1] D. Taylor, *The Theory of Critical Distances: a New Perspective in Fracture Mechanics*, Elsevier, Oxford, UK, 2007.
- [2] D. Taylor, P. Cornetti, N. Pugno, The fracture mechanics of finite crack extension, *Engineering Fracture Mechanics* **72**, 1021-1038, 2005.
- [3] H. Neuber, *Theory of notch stresses: principles for exact calculation of strength with reference to structural form and material*. Berlin: Springer Verlag, 1958.
- [4] R.E. Peterson, Notch sensitivity, in: *Sines G, Waisman JL, eds. Metal fatigue*. New York, McGraw Hill, pp. 293–306, 1959.
- [5] M. Creager, C. Paris, Elastic Field Equations for Blunt Cracks with Reference to Stress Corrosion Cracking, *International Journal of Fracture* **3**, 247-252, 1967.
- [6] FITNET Fitness-for-Service (FFS) Proceure - Vol 1, M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers, eds., Printed by GKSS, Germany, 2008.
- [7] Anderson TL. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. Florida: CRC Press; 2005.
- [8] S. Cicero, V. Madrazo, I.A. Carrascal, Analysis of Notch Effect in PMMA by Using the Theory of Critical Distances, *Engineering Fracture Mechanics* **86**, 56-72, 2012.
- [9] V. Madrazo, S. Cicero, I.A Carrascal, On the point method and the line method notch effect predictions in Al7075-T651, *Engineering Fracture Mechanics* **79**, 363–379, 2012.
- [10] S. Cicero, V. Madrazo, T. García, J. Cuervo, 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, *Engineering Failure Analysis* **29**, 108-121, 2013.
- [11] S. Cicero, V. Madrazo, T. García, Analysis of notch effect in the apparent fracture toughness and the fracture micromechanisms of ferritic-pearlitic steels operating within their lower shelf, *Engineering Failure Analysis* **36**, 322-342, 2014.
- [12] S. Cicero, T. García, J. Castro, V. Madrazo, D. Andrés, Analysis of notch effect on the fracture behaviour of granite and limestone: An approach from the Theory of Critical Distances, *Engineering Geology* **177**, 1-9, 2014.
- [13] S. Cicero, T. García, V. Madrazo, On the Line Method apparent fracture toughness evaluations: Experimental overview, validation and some consequences on fracture assessments, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* **78**, 15-19, 2015.
- [14] S. Cicero, V. Madrazo, I.A. Carrascal, R. Cicero, Assessment of notched structural components using failure assessment diagrams and the theory of critical distances, *Engineering Fracture Mechanics* **78**, 2809–2825, 2011.
- [15] V. Madrazo, S. Cicero, T. García, , Assessment of notched structural steel components using failure assessment diagrams and the theory of critical distances, *Engineering Failure Analysis* **36**, 104-120, 2014.
- [16] S. Cicero, V. Madrazo, T. García, On the assessment of U-shaped notches using Failure Assessment Diagrams and the Line Method: experimental overview and validation, *Theoretical and Applied Fracture mechanics*, Accepted for publication, 2015.
- [17] A.G. Miller, Review of limit loads of structures containing defects, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **32**, 197-327, 1988.
- [18] A.J. Horn, A.H. Sherry, An engineering assessment methodology for non-sharp defects in steel structures - Part I: Procedure development, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **89**, 137-150, 2012.
- [19] A.J. Horn, A.H. Sherry, An engineering assessment methodology for non-sharp defects in steel structures - Part II: Procedure validation and constraint analysis, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **89**, 151-161, 2012.
- [20] BS 7910: 2013, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, British Standards Institution, London, UK, 2013.
- [21] ASTM E1820-09e1, Standard test method for measurement of fracture toughness, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2009.