

VALORES POR DEFECTO DE LA DISTANCIA CRÍTICA EN ACEROS ESTRUCTURALES. ESTIMACIONES DE LA TENACIDAD APARENTE A FRACTURA EN PRESENCIA DE ENTALLAS EN U

S. Cicero¹, J.D. Fuentes^{1,*}, I. Procopio¹, V. Madrazo², P. González¹

¹ LADICIM (Laboratory of Materials Science and Engineering), University of Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, 39005 Santander, Spain; fuentesjd@unican.es, ciceros@unican.es, pessoai@unican.es, glezpablo@unican.es

² Centro Tecnológico de Componentes-CTC, C/Isabel Torres n°1, 39011 Santander, Spain; madrazo.virginia@external.ensa.es

* Persona de contacto: fuentesjd@unican.es

RESUMEN

La evaluación de integridad estructural de componentes con defectos tipo entalla ha sido objeto de una extensa investigación en las últimas décadas. La asunción de que las entallas se comportan como fisuras es generalmente muy conservadora, haciendo necesario desarrollar metodologías de análisis que consideren la naturaleza específica de las entallas, de tal forma que se obtengan predicciones seguras y precisas de las cargas de rotura o del tamaño del defecto. Entre las diferentes teorías o modelos que se han desarrollado para abordar este tema, la Teoría de las Distancias Críticas (TDC) es una de las más aplicadas y extendidas. Esta teoría es realmente un grupo de metodologías que tienen en común el uso de la tenacidad del material y un parámetro de longitud que depende del material (la distancia crítica, L). Este parámetro de longitud requiere calibración en aquellas situaciones en las que haya comportamiento no lineal, tanto en la escala micro como en la macro. Este proceso de calibración constituye la principal barrera práctica para el uso frecuente de la TDC en aceros estructurales. La principal propuesta de este artículo es proveer a través de un conjunto de valores por defecto propuestos, una metodología para estimar de forma precisa tanto la distancia crítica en aceros estructurales a temperaturas de la zona de transición como la tenacidad aparente a fractura derivada del uso de la TDC.

PALABRAS CLAVE: Fractura, Entalla, Distancia crítica, Acero estructural

ABSTRACT

The structural integrity assessment of components containing notch-type defects has been the subject of extensive research in the last few decades. The assumption that notches behave as cracks is generally too conservative, making it necessary to develop assessment methodologies that consider the specific nature of notches, providing accurate safe predictions of failure loads or defect sizes. Among the different theories or models that have been developed to address this issue the Theory of Critical Distances (TCD) is one of the most widely applied and extended. This theory is actually a group of methodologies that have in common the use of the material toughness and a length parameter that depends on the material (the critical distance; L). This length parameter requires calibration in those situations where there is a certain non-linear behavior on the micro or the macro scale. This calibration process constitutes the main practical barrier for an extensive use of the TCD in structural steels. The main purpose of this paper is to provide, through a set of proposed default values, a simple methodology to accurately estimate both the critical distance of structural steels and the corresponding apparent fracture toughness predictions derived from the TCD.

KEYWORDS: Fracture, Notch, Critical distance, Structural steel

1. INTRODUCCIÓN

Hay muchas situaciones en las que los defectos responsables del fallo estructural no son fisuras (i.e., defectos afilados cuyo radio en el frente tiende a cero). Si los defectos son romos (ej., entallas), puede ser excesivamente conservador asumir que estos se comportan como fisuras afiladas y, por tanto, lo es también aplicar metodologías para el análisis de fisuras afiladas, generalmente basadas en la mecánica de la fractura. El motivo de dicho conservadurismo es que los

componentes entallados desarrollan una capacidad de carga mayor que la soportada por los componentes fisurados.

Para situaciones de fallo frágil en componentes fisurados en los que predomina el comportamiento elástico lineal, la mecánica de la fractura establece que el fallo ocurre cuando el factor de intensidad de tensiones aplicado (K) es igual a la tenacidad a fractura del material (K_{mat}):

$$K = K_{mat} \tag{1}$$

Sin embargo, los componentes entallados están sujetos a campos de tensiones menos severos en el fondo del defecto, desarrollando así mayor resistencia a fractura (a menudo referida como tenacidad aparente a fractura). Si esto no se tiene en cuenta en el análisis, se demuestra que la ecuación (1) es excesivamente conservadora.

La naturaleza específica de las entallas y sus consecuencias en el comportamiento del material, han requerido el desarrollo de aproximaciones específicas para el análisis a fractura de materiales que contienen este tipo de defectos. En este sentido, el análisis del comportamiento a fractura de las entallas se puede llevar a cabo empleando diferentes criterios: la Teoría de las Distancias Críticas [1-3], Modelos de Zona de Proceso [4,5], el criterio de la Densidad de Energía de Deformación (DED) [6,7], etc. Algunos de ellos están relacionados entre sí, por lo que no es sencillo establecer los límites entre ellos. En cualquier caso, la TDC ha sido aplicada con éxito a diferentes mecanismos de fallo (ej. fatiga, fractura) y materiales, y es particularmente sencilla de implementar en los análisis de integridad estructural [1-3]. Por estas razones, este trabajo se centra en esta aproximación al estudio de las entallas.

2. LA TEORÍA DE LAS DISTANCIAS CRÍTICAS

La Teoría de las Distancias Críticas (TDC) consiste en un conjunto de metodologías cuya característica común es que todas ellas emplean un parámetro de longitud característico del material (la distancia crítica) cuando se realizan las evaluaciones de fractura. Los orígenes de la TDC datan de mediados del siglo XX [8,9], pero ha sido en las dos últimas décadas cuando ha experimentado un gran desarrollo, proporcionando respuestas a diferentes problemas científicos e ingenieriles [1-3,10-12].

El parámetro de longitud mencionado anteriormente se refiere generalmente a la distancia crítica, L , que en los análisis a fractura sigue la ecuación (2) [1]:

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

donde K_{mat} es la resistencia a fractura del material (obtenida en condiciones fisuradas) y σ_0 es un parámetro de resistencia característico del material, conocido como tensión inherente, que generalmente es mayor que la tensión de rotura (σ_u) y requiere calibración. Cuando el comportamiento del material es completamente elástico-lineal, σ_0 es igual a σ_u , y obtener L es sencillo una vez que la tenacidad a fractura y la tensión de rotura del material son conocidas.

Entre las metodologías que componen la TDC, el Método del Punto (MP) y el Método de la Línea (ML) destacan por su simplicidad y aplicabilidad.

De estos, el MP es la metodología más sencilla, y establece que la fractura tiene lugar cuando la tensión a una distancia $L/2$ del fondo de la entalla es igual a la tensión inherente [1]. El criterio de fractura resultante es, por lo tanto:

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

Mientras que, el ML asume que la fractura ocurre cuando la tensión media a lo largo de una cierta distancia, $2L$, alcanza el valor de la tensión inherente [1].

$$\frac{1}{2L} \int_0^{2L} \sigma(r) dr = \sigma_0 \tag{4}$$

Ambos métodos proporcionan expresiones para la tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) exhibida por materiales que contienen entallas en U cuando se combinan con la distribución de tensiones elástico-lineal en el fondo de la entalla propuesta por Creager y Paris [13], que es igual a aquella que hay en el frente de la fisura desplazada una distancia $\rho/2$ a lo largo del eje x (que está situado en el plano bisector de la entalla y tiene origen en el fondo de la misma [13]).

$$\sigma(r) = \frac{K}{\sqrt{\pi}} \frac{2(r + \rho)}{(2r + \rho)^{\frac{3}{2}}} \tag{5}$$

donde K es el factor de intensidad de tensiones para una fisura con el mismo tamaño que la entalla, ρ es el radio de entalla, y r es la distancia desde el fondo de la entalla hasta el punto analizado. Con el fin de tener en cuenta el rango de validez de las ecuaciones derivadas posteriormente, hay que señalar que la ecuación (5) se ha obtenido para entallas largas y finas (ej. profundidad de la entalla \gg radio de entalla) y solo es válido para pequeñas distancias desde el frente de la entalla ($r \ll$ profundidad de la entalla).

Si se aplica el MP, la ecuación (3) se puede combinar con la ecuación (5), proporcionando [1]:

$$K_{mat}^N = K_{mat} \frac{\left(1 + \frac{\rho}{L} \right)^{\frac{3}{2}}}{\left(1 + \frac{2\rho}{L} \right)} \tag{6}$$

Esta ecuación permite estimar la tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) de un material dado con entallas en U a partir de la tenacidad a fractura del material (K_{mat} obtenida en condiciones fisuradas), el radio de entalla (ρ) y la distancia crítica del material (L). Análogamente, cuando se considera el ML (ecuación (4)) junto con la distribución de tensiones de Creager-Paris (ecuación (5)), el resultado es una ecuación aún más simple [1]:

$$K_{mat}^N = K_{mat} \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L}} \quad (7)$$

Estas ecuaciones tienen implicaciones desde un punto de vista práctico, ya que con cualquiera de ellas el análisis a fractura de un componente entallado se reduce a una situación equivalente de un componente fisurado, solo con la particularidad de considerar K_{mat}^N en lugar de K_{mat} . De acuerdo a esto, la fractura tiene lugar cuando:

$$K_I = K_{mat}^N \quad (8)$$

Además, las ecuaciones (6) y (7) proporcionan predicciones similares de K_{mat}^N . Por este motivo, el análisis mostrado posteriormente está enfocado en las predicciones del ML de K_{mat}^N (ecuación (7)), aunque valores similares se pueden obtener para el MP (ecuación (6)).

3. MATERIALES, MÉTODOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los autores han publicado varios artículos mostrando la aplicación de la TDC en un amplio rango de aceros estructurales: S275JR, S355J2, S460M, S690Q (ej. [14,15]). Estos aceros se han ensayado a 3 temperaturas diferentes de su correspondiente zona de transición dúctil-frágil (ZTDF). Por tanto, el programa experimental resultante recogido aquí incluye 12 comportamientos mecánicos diferentes, que se muestran en la Tabla 1 [15,16]. El radio de entalla varía entre los 0 mm (defectos tipo fisura) hasta los 2.0 mm en todos los casos.

Tabla 1. Resumen de los resultados experimentales analizados en este artículo [15,16].

Acero	Ensayos	K_{mat} (MPa·m ^{1/2})	L (mm)	σ_u (MPa)	σ_0 (MPa)
S275JR (-50 °C)	24	80.60	0.0049	565	20543
S275JR (-30 °C)	24	100.70	0.0061	549	23003
S275JR (-10 °C)	34	122.80	0.0083	536	24048
S355J2 (-150 °C)	21	60.56	0.0084	758	11789
S355J2 (-120 °C)	22	146.60	0.0168	672	20179
S355J2 (-100 °C)	35	157.40	0.0140	647	23734
S460M (-140 °C)	24	45.60	0.0028	795	15375
S460M (-120 °C)	24	88.29	0.0075	759	18189
S460M (-100 °C)	33	88.58	0.0053	727	21708
S690Q (-140 °C)	24	69.11	0.0069	1112	14844
S690Q (-120 °C)	24	103.80	0.0131	1061	16180
S690Q (-100 °C)	34	125.40	0.0170	1016	17159

En la Figura 1 se muestra cómo se obtiene el valor de la distancia crítica (L) para el caso del acero S355J2 trabajando a -100 °C, para ello se realiza el mejor ajuste de los resultados experimentales (ecuación (7)) propuesta por el ML).

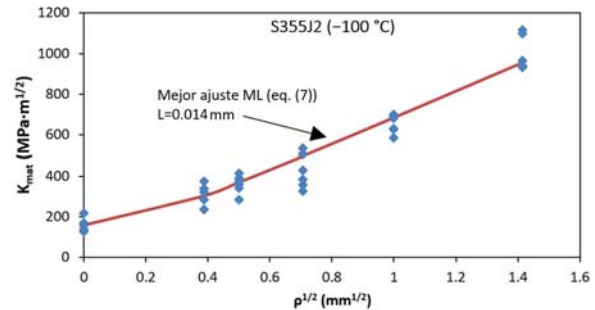


Figura 1. Resultados experimentales de resistencia a fractura de probetas entalladas, mejor ajuste del Método de la Línea (ML) y obtención de la distancia crítica correspondiente. Acero S355J2 (-100 °C).

Los ensayos de tenacidad a fractura (probetas fisuradas) y los ensayos de tenacidad aparente a fractura (probetas entalladas) se han realizado de acuerdo a la norma ASTM 1820 [17], otras aproximaciones alternativas se pueden encontrar en la literatura (ej. [18-22]), mientras que los valores de L de los cuatro aceros a las diferentes temperaturas (ver Tabla 1) fueron calibrados mediante el mejor ajuste por mínimos cuadrados de los resultados experimentales. Los valores de σ_0 se obtienen directamente de la ecuación (2) una vez que los valores de K_{mat} y L son conocidos. El número total de ensayos es de 323 con valores que valores de L que varían entre 0.0028 mm y 0.017 mm. Por tanto, los resultados experimentales recogidos aquí, representan un amplio rango de situaciones.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Una vez definidos los valores de L (calibrado por mejor ajuste) y los correspondientes valores de σ_0 mediante la ecuación (2), y siempre que se conozcan los valores de σ_u para cada condición del material, se propone establecer la relación adimensional entre la tensión inherente (σ_0) y la tensión de rotura del material (σ_u):

$$m = \frac{\sigma_0}{\sigma_u} \quad (9)$$

Para cada acero y cada temperatura de ensayo se puede obtener un valor conservador de m. Este valor de m, combinado con la tensión de rotura del material (σ_u), puede sustituir a la tensión inherente (σ_0) en la ecuación (2), resultando en un valor por defecto (conservador) de la distancia crítica (L_d) que no necesita ser calibrado y permite que la TDC se pueda aplicar de forma segura:

$$L_d = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}}{m \cdot \sigma_u} \right)^2 \quad (10)$$

Esta metodología se ha presentado por los autores en [23], proporcionando valores por defecto conservadores para diferentes tipos de materiales: aceros, aleaciones de aluminio, polímeros, cerámicos, rocas y compuestos. Este trabajo se basa en una amplia base de datos de resultados experimentales obtenidos en probetas de fractura entalladas. El presente trabajo, sin embargo, particulariza el análisis a los aceros estructurales, proporcionando valores más precisos de L para aceros estructurales trabajando en la ZTDF (aunque todavía conservadores).

Como se puede observar en la Figura 2, para aceros estructurales operando en la ZTDF el valor de la envolvente inferior propuesto en la referencia [23] es 13.0. En este trabajo se proporciona una curva de ajuste con el objetivo de mejorar la precisión de las predicciones (σ_u en MPa):

$$m = \frac{8 \cdot \sigma_u}{\sigma_u - 380} \quad (11)$$

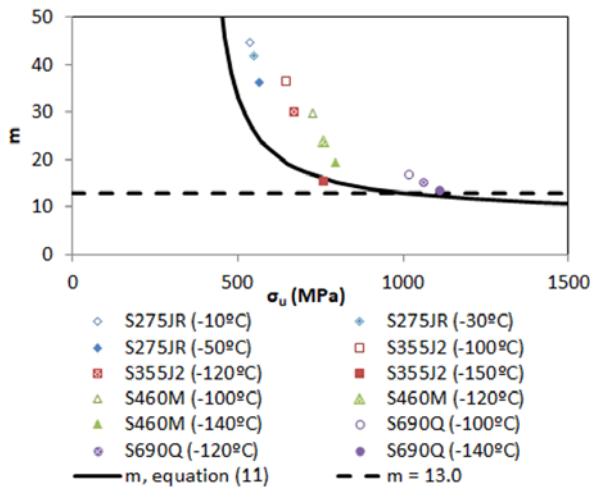


Figura 2. Valores de m frente a la tensión de rotura de aceros trabajando en la ZTDF.

Cuando se compara el valor de la envolvente inferior propuesto en [23] ($m = 13$) con la ecuación (11), se observa que el valor de la envolvente inferior parece preciso para altas tensiones de rotura (ej. mayores de 1000 MPa), pero es claramente conservador para aceros con un rango de tensiones de rotura entre 500 y 800 MPa aproximadamente.

Aquí se puede notar que el rango de validez de todos esos valores de m propuestos están limitados a las calidades de acero cubiertas por este trabajo.

Con todo esto, las estimaciones de K_{mat}^N empleando el ML se pueden obtener fácilmente mediante la expresión:

$$K_{mat}^N = K_{mat} \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L_d}} \quad (12)$$

Las Figuras 3 y 4 muestran las predicciones para los 323 ensayos. Se puede observar que, con el fin de realizar un análisis homogéneo, tanto los valores de tenacidad a fractura aparente como los valores del radio de entalla se han normalizado mediante la tenacidad a fractura obtenida en condiciones fisuradas y mediante la correspondiente distancia crítica, en un gráfico donde se representa (K_{mat}^N/K_{mat}) frente a $(\rho/L_d)^{1/2}$.

Las dos líneas en cada Figura corresponden a los dos valores diferentes de K_{mat} introducidos en la ecuación (12) para realizar el análisis: el valor medio de los resultados experimentales (K_{mat}) para cada acero y cada temperatura de ensayo, y $K_{mat,0.95}$, que está asociado a un 95% de confianza.

El último se ha obtenido asumiendo una distribución normal de los resultados obtenidos en condiciones fisuradas (K_{mat}), y sería la predicción requerida para realizar las evaluaciones de integridad estructural, mientras que el primero sería la predicción que mejor capta la física del fenómeno analizado. El nivel de confianza mencionado anteriormente está, por lo tanto, limitado por los resultados a fractura obtenidos en condiciones entalladas (ej. el resto de la curva), el uso de $K_{mat,0.95}$ proporciona una estimación más conservadora de la tenacidad aparente a fractura que aquella obtenida con la media de los valores de la tenacidad a fractura (K_{mat}), pero las correspondientes predicciones no están necesariamente asociadas a un 95% de confianza.

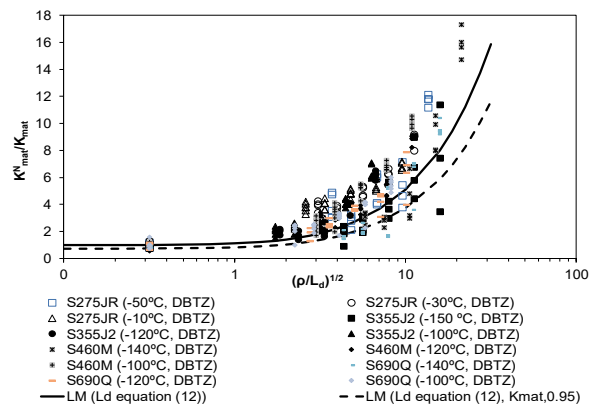


Figura 3. Predicciones de la tenacidad aparente a fractura (m obtenido de la ecuación (11)) y comparación con los resultados experimentales.

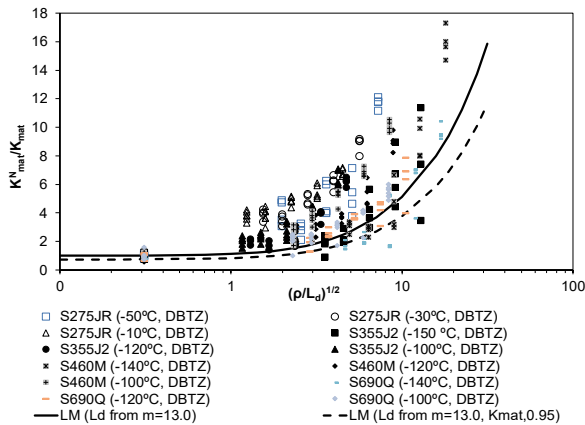


Figura 4. Predicciones de la tenacidad aparente a fractura ($m = 13.0$) y comparación con los resultados experimentales.

De los resultados mostrados en las Figuras 3 y 4, se pueden realizar las siguientes observaciones:

- 1 Las predicciones del ML derivadas de los valores por defecto de la distancia crítica del material (L_d) capturan una parte significativa de la física del efecto entalla, dado que la predicción del ML sigue adecuadamente la tendencia de los resultados experimentales, que se han obtenido para una amplia variedad de aceros estructurales y condiciones. Los resultados son particularmente precisos considerando la ecuación (11) y el valor medio de la tenacidad a fractura del material (K_{mat}) para cada acero y temperatura de trabajo. Estas ecuaciones de ajuste reducen significativamente el conservadurismo obtenido de los valores de la envolvente inferior propuesta en [23].
- 2 Si las predicciones del ML son empleadas en evaluaciones de integridad estructural, aunque el uso de K_{mat} (valor medio de la tenacidad a fractura obtenida en condiciones fisuradas) captura gran parte del efecto entalla, puede ser inseguro en ocasiones debido a la elevada dispersión de los procesos de fractura. Esto significa que a veces proporciona valores de la tenacidad aparente a fractura mayores que los medidos experimentalmente (ver Figura 1). Con el fin de proporcionar una herramienta de evaluación para ser empleada en evaluaciones de integridad estructural, es necesario proponer una metodología que sea capaz de proveer predicciones seguras de la tenacidad aparente a fractura. Con este objetivo, se propone usar la tenacidad a fractura asociada a un 95% de confianza ($K_{mat,0.95}$).
- 3 Por tanto, la metodología más precisa, aunque conservadora para la estimación de la tenacidad aparente a fractura surge de la combinación de

$K_{mat,0.95}$ (como tenacidad aparente a fractura) y los valores de m derivados de la ecuación (11).

5. CONCLUSIONES

El objetivo de este artículo ha sido proporcionar una metodología simple y precisa para estimar tanto la distancia crítica de aceros estructurales como las correspondientes predicciones de la tenacidad a fractura derivadas de la Teoría de las Distancias Críticas, particularmente empleando el Método de la Línea. Esto se ha realizado a través de un conjunto de factores propuestos (valores de m) que multiplican la tensión de rotura del material, evitando cualquier necesidad de calibración previa, y permitiendo obtener valores por defecto de la distancia crítica (L_d). Los factores m se han proporcionado como curvas de ajuste dependientes exclusivamente de la tensión de rotura del material. Los resultados también muestran el empleo de valores de m propuestos previamente (envolvente inferior), que devuelven estimaciones más conservadoras de la tenacidad aparente a fractura del material.

La metodología se ha aplicado a cuatro aceros estructurales (S275JR, S355J2, S460M y S690Q) ensayados en condiciones entalladas (entallas en U) y operando en la zona de transición dúctil-frágil del material. Los valores experimentales de la tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) y los valores de los radios de entalla se han normalizado mediante la correspondiente tenacidad a fractura (K_{mat} o $K_{mat,0.95}$) obtenida en condiciones fisuradas, y mediante los valores por defecto derivados de la distancia crítica (L_d) respectivamente, representando los 323 ensayos en gráficos (K_{mat}^N/K_{mat}) - (ρ/L_d).

Los resultados demuestran la capacidad de la metodología propuesta para proporcionar estimaciones seguras de la tenacidad aparente a fractura, capturando una parte significativa del efecto entalla y, por tanto, reduciendo el conservadurismo asociado con la asunción de que las entallas se comportan como fisuras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al MINECO la financiación recibida del proyecto MAT2014-58443-P. “Análisis del comportamiento en fractura de componentes estructurales con defectos en condiciones de bajo confinamiento tensional,” en el que están basados los resultados de este artículo.

REFERENCIAS

[1] D. Taylor, The Theory of Critical Distances: A New Perspective in Fracture Mechanics; Elsevier: Oxford, UK (2007).

- [2] S. Cicero, V. Madrazo, I.A. Carrascal, R. Cicero. Assessment of notched structural components using failure assessment diagrams and the theory of critical distances. *Eng. Fract. Mech.* (2011) 78:2809–2825.
- [3] S. Cicero, V. Madrazo, I.A. Carrascal. Analysis of notch effect in PMMA using the theory of critical distances. *Eng. Fract. Mech.* (2012) 86:56–72.
- [4] D.S. Dugdale. Yielding of steel sheets containing slits. *J. Mech. Phys. Solids* (1960) 8:100–108.
- [5] F.J. Gómez, M. Elices, A. Valiente. Cracking in PMMA containing U-shaped notches. *Fat. Frac. Eng. Mat. Struct.* (2000) 23:795–803.
- [6] G.C. Sih. Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems. *Int. J. Fract.* (1974) 10:305–321.
- [7] F. Berto, P. Lazzarin. Recent developments in brittle and quasi-brittle failure assessment of engineering materials by means of local approaches. *Mater. Sci. Eng. R* (2014) 75:1–48.
- [8] H. Neuber. *Theory of Notch Stresses: Principles for Exact Calculation of Strength with Reference to Structural form and Material*; Springer: Berlin, Germany, (1958).
- [9] R.E. Peterson. Notch sensitivity. In *Metal Fatigue*; McGraw Hill: New York, NY, USA, (1959) pp. 293–306.
- [10] L. Susmel, D. Taylor. On the use of the Theory of Critical Distances to predict failures in ductile metallic materials containing different geometrical features. *Eng. Fract. Mech.* (2008) 75:4410–4421.
- [11] L. Susmel, D. Taylor. An elasto-plastic reformulation of the Theory of Critical Distances to estimate lifetime of notched components failing in the low/medium-cycle fatigue regime. *J. Eng. Mater. Technol.* (2010) 132.
- [12] D. Taylor. A mechanistic approach to critical-distance methods in notch fatigue. *Fatig. Fract. Eng. Mater. Struct.* (2001) 24:215–224.
- [13] M. Creager, P.C. Paris. Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking. *Int. J. Fract.* (1967) 3:247–252.
- [14] FITNET Fitness-for-Service (FFS) Procedure-Volume 1; M. Kocak, S. Webster, J.J. Janosch, R.A. Ainsworth, R. Koers, eds; GKSS Forschungszentrum: Geesthacht, Germany, (2008).
- [15] 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. *Eng. Fail. Anal.* (2014) 36:322–342.
- [16] S. Cicero, T. García, V. Madrazo. Application and validation of the Notch Master Curve in medium and high strength structural steels. *J. Mech. Sci. Tech.* (2015) 29:4129–4142.
- [17] ASTM E1820-09e1. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness; American Society for Testing and Materials: Philadelphia, PA, USA, (2009).
- [18] G.D. Quinn, R.C. Bradt. On the Vickers Indentation Fracture Test. *J. Am. Ceram. Soc.* (2007) 90:673–680.
- [19] A.T. Akono, N.X. Randall, F.J. Ulm. Experimental determination of the fracture toughness via microscratch tests: Application to polymers, ceramics, and metals. *J. Mater. Res.* (2012) 27: 485–493.
- [20] A.T. Akono, F.J. Alm. An improved technique for characterizing the fracture toughness via scratch test experiments. *Wear* (2014) 313:117–124.
- [21] R. Sola, R. Giovanardi, G. Parigi, P.A. Varonesi. Novel Method for Fracture Toughness Evaluation of Tool Steels with Post-Tempering Cryogenic Treatment. *Metals* (2017) 7:75.
- [22] R. Lacalle, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana. Use of Small Punch Notched Specimens in the Determination of Fracture Toughness. *ASME Press. Vessels Pip. Conf.* (2008) 6:1363–1369.
- [23] J.D. Fuentes, S. Cicero, I. Procopio. Some default values to estimate the critical distance and their effect on structural integrity assessments. *Theor. Appl. Fract. Mech.* (2017) 90:204–212.