

## ANÁLISIS DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE ACEROS FERRÍTICOS ENTALLADOS EN LA ZONA DE TRANSICIÓN DÚCTIL-FRÁGIL

S. Cicero<sup>1\*</sup>, T. García<sup>1</sup>, V. Madrazo<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Fundación Centro Tecnológico de Componentes (CTC), Parque Científico y Tecnológico de Cantabria (PCTCAN), C/ Isabel Torres nº 1, 39011, Santander, Spain

\*E-mail: [ciceros@unican.es](mailto:ciceros@unican.es)

### RESUMEN

Este artículo proporciona una metodología de evaluación de la integridad estructural de aceros ferríticos entallados que operan a temperaturas propias de su zona de transición dúctil-frágil. La metodología se basa en el uso de Diagramas de Fallo y en el concepto de Curva Maestra de Entallas, y queda validada por los resultados obtenidos en su aplicación a 164 ensayos de fractura que combinan dos materiales (aceros S275JR y S690Q), seis tipos de radios de entalla (desde 0 mm hasta 2.0 mm), dos tipos de probeta (CT y SENB), y tres temperaturas diferentes dentro de cada zona de transición dúctil-frágil.

### ABSTRACT

This paper provides a structural integrity assessment methodology for the analysis of ferritic steels containing notch-type defects and operating within their ductile-to-brittle transition zone. The methodology, based on the use of Failure Assessment Diagrams and the novel concept of Notch Master Curve, has been applied to 164 experimental results performed on two different steels (S275J and S690Q), six different notch radii (from 0 mm up to 2.0 mm), two different types of specimens (CT and SENB), and three different temperatures within the corresponding ductile-to-brittle transition zone. The results validate the proposed assessment methodology.

**PALABRAS CLAVE:** acero ferrítico, efecto entalla, curva de transición, diagrama de fallo, curva maestra de entalla.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Efecto entalla y Teoría de las Distancias Críticas

Tal y como queda ampliamente documentado en la literatura (ej., [1-10]) los componentes con entallas desarrollan una mayor capacidad resistente que la que desarrollan cuando se encuentran fisurados. Sin embargo, es una práctica frecuente en ingeniería analizar las entallas como si fueran fisuras, dando como resultado análisis que en muchos casos son excesivamente conservadores.

En las últimas décadas han proliferado distintos enfoques para el análisis de entallas. Este trabajo se centra exclusivamente en los enfoques locales englobados dentro de la Teoría de las Distancias Críticas (TDC): el Método del Punto (PM, *Point Method*) y el Método de la Línea (LM, *Line Method*). Ambas metodologías utilizan un parámetro característico del material con unidades de longitud (la distancia crítica, L) [1,2]:

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

Donde  $K_{mat}$  es la tenacidad a fractura del material y  $\sigma_0$  es un parámetro resistente característico del material (denominado tensión inherente), generalmente mayor que  $\sigma_u$ , que debe ser calibrado.

El PM asume que el fallo se produce cuando la tensión alcanza el valor de la tensión inherente ( $\sigma_0$ ) a una distancia  $L/2$  del frente de la entalla:

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

El LM supone por su parte que el fallo se produce cuando la tensión media a lo largo de una longitud  $2L$  alcanza el valor de la tensión inherente,  $\sigma_0$ :

$$\frac{1}{2L} \int_0^{2L} \sigma(r) dr = \sigma_0 \quad (3)$$

Estas metodologías, basándose en la distribución de tensiones en el fondo de entalla propuesta por Creager-Paris [5], pueden aplicarse para generar predicciones de la tenacidad aparente ( $K_{mat}^N$ ) que presentan los

componentes entallados [1]. Si se utiliza el PM se obtiene fácilmente la ecuación (4) [1]:

$$K_{mat}^N = K_{mat} \frac{\left(1 + \frac{\rho}{L}\right)^{3/2}}{\left(1 + \frac{2\rho}{L}\right)} \quad (4)$$

Si se aplica el LM se obtiene la ecuación (5):

$$K_{mat}^N = K_{mat} \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L}} \quad (5)$$

### 1.2. Los Diagramas de Fallo

La metodología FAD (*Failure Assessment Diagrams*) es una herramienta ingenieril que permite evaluar componentes estructurales frente a situaciones que van desde la fractura frágil hasta el colapso plástico. Para ello se necesita una relación entre los parámetros que evalúan ambos procesos, denominados  $K_r$  y  $L_r$ , respectivamente

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (6)$$

$$L_r = \frac{P}{P_L} \quad (7)$$

$K_I$  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 o límite. La situación del componente evaluado frente a la rotura se obtiene mediante un punto de coordenadas ( $K_r$ ,  $L_r$ ), mientras que la condición crítica o de rotura queda determinada por 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 línea de fallo y los ejes coordenados se considera aceptable (A), si queda por encima de la línea de fallo se considera que el componente falla (C) y si el punto queda justo encima de la FAL es la condición de rotura (B).

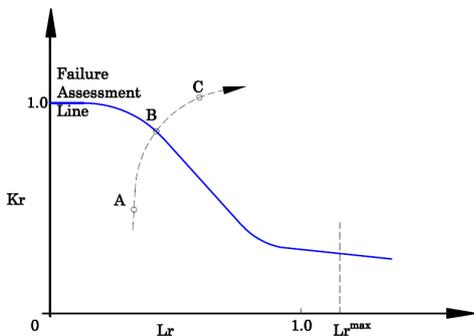


Fig.1. Análisis FAD con las 3 situaciones posibles: A, situación segura; B, situación crítica y C, situación inaceptable.

### 1.3. La Curva Maestra de Entallas

La Curva Maestra (CM) [11,12] constituye una herramienta de caracterización a fractura en la Zona de Transición Dúctil-Frágil (ZTDF) de aceros ferríticos. El comportamiento en fractura de un determinado acero en su ZTDF queda completamente caracterizado una vez conocida la Temperatura de Referencia ( $T_0$ ) del mismo, que es aquella temperatura a la cual la mediana de la distribución de tenacidades a fractura ( $K_{mat}$ , en forma de  $K_{Jc}$ ) resulta ser igual a  $100 \text{ MPam}^{1/2}$  en probetas de 25 mm de espesor. Conocida  $T_0$ , es posible determinar la Curva Maestra para distintos valores de probabilidad de fallo. Así, en probetas de 25 mm de espesor ( $1T$ , o  $B_0$ ), la curva asociada a una probabilidad de fallo del 5% es:

$$K_{Jc0.05} = 25.2 + 36.6 \cdot e^{0.019(T-T_0)} \quad (8)$$

Para cualquier otro espesor ( $B_x$ ) distinto de 25 mm ( $B_0$ ), [12] propone la siguiente corrección:

$$K_{Jc(x)} = 20 + [K_{Jc(0)} - 20] \left(\frac{B_0}{B_x}\right)^{1/4} \quad (9)$$

De esta manera, la ecuación (8) puede generalizarse y sustituirse por la ecuación (10):

$$K_{Jc(x)0.05} = 20 + [5.2 + 36.6 \cdot e^{0.019(T-T_0)}] \left(\frac{B_0}{B_x}\right)^{1/4} \quad (10)$$

Para aquellas situaciones en las que el material se encuentra entallado, los autores han definido la denominada Curva Maestra de Entallas (CME) [13,14], que combina la CM del material (propia del material en presencia de fisuras) con las correcciones por efecto entalla proporcionadas por la TDC. A este último respecto, y por simplicidad, se considerará la corrección proporcionada por el LM en la expresión de la tenacidad aparente a fractura (ecuación (5)). Así, la ecuación (10) queda corregida por efecto entalla (dando lugar a la CME) de la siguiente manera:

$$K_{Jc(x)0.05}^N = \left[ 20 + [5.2 + 36.6 \cdot e^{0.019(T-T_0)}] \left(\frac{B_0}{B_x}\right)^{1/4} \right] \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L}} \quad (11)$$

La utilización de estas expresiones permite la aplicación de la CME en cualquier espesor de componente, y asume que el efecto del espesor es independiente del efecto entalla.

## 2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PROPUESTA

El análisis de fisuras mediante FADs requiere de la definición de  $K_r$ ,  $L_r$  y la FAL. La metodología propuesta en este trabajo para la evaluación de entallas

mantiene la misma definición de  $L_r$  y de la FAL que las utilizadas en el caso del análisis de fisuras, en tanto que en la definición de  $K_r$  se propone sustituir la ecuación (6) por:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{Jc(x)}^N} = \frac{K_I}{\left[ 20 + [5.2 + 36.6 \cdot e^{0.019(T-T_0)}] \left( \frac{B_0}{B_x} \right)^{1/4} \right]} \cdot \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L}} \quad (11)$$

En donde  $K_I$  es también el factor de intensidad de tensiones utilizado en el caso de las fisuras. En definitiva, se propone sustituir un problema entallado en un material con resistencia a fractura  $K_{mat}$  o  $K_{Jc}$  por un problema equivalente en material fisurado con una resistencia a fractura mayor ( $K_{mat}^N$  o  $K_{Jc}^N$ ). El uso de las soluciones de  $L_r$  y FAL desarrolladas para fisuras al caso de las entallas viene justificado por [15] y [16], respectivamente.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales y probetas ensayados son los siguientes:

- Acero S275JR: 84 probetas CT de 25 mm de espesor con radios de entalla de 0 mm a 2.0 mm (ver Tabla 1). Las temperaturas de ensayo -10°C, -30°C y -50°C. El material presenta microestructura ferrítico perlítica.
- Acero S690Q: 84 probetas SENB de 15 mm de espesor, con 6 radios de entalla diferentes y ensayos a -100 °C, -120°C y -140°C (ver Tabla 1). El acero presenta una microestructura de bainita y martensita revenida.

La Tabla 1 recoge la carga crítica ( $P_{max}$ ) de cada uno de los ensayos, que será la utilizada en la definición de  $K_r$  y  $L_r$ . Puede observarse que cuatro ensayos no fueron válidos.

La línea de fallo utilizada fue la Option 1 de la BS7910 [17], en tanto que las soluciones de  $K_I$  y  $P_L$  se tomaron de [18]. La Tabla 2 recoge las propiedades mecánicas necesarias para los cálculos.

### 4. RESULTADOS

Esta sección muestra el análisis FAD de las 164 probetas incluidas en el programa experimental que dieron lugar a resultados válidos. Se muestran los resultados de la evaluación de integridad estructural de las mismas en rotura sin realizar ningún tipo de corrección por efecto entalla (es decir, evaluando las entallas como si fueran fisuras), y los resultados derivados de la aplicación de la metodología de análisis planteada en este trabajo, que tiene en cuenta el efecto entalla en la ZTDF mediante el uso de la CME en la definición del parámetro  $K_r$  del FAD (ecuación (11)).

Tabla 1. Relación de probetas ensayadas, condiciones de ensayo, radios de entalla y cargas críticas ( $P_{max}$ )

S275JR	T (°C)	ρ (mm)	P <sub>max</sub> (kN)	S690Q	T (°C)	ρ (mm)	LBC (kN)
2-1	-10	0	43.0	6-1	-100	0	24.21
2-2			39.3	6-2			30.61
2-3			39.3	6-3			19.57
2-4			40.4	6-4			24.39
2-5			37.1	6-5			20.41
2-6			39.2	6-6			-
2-7		0.15	0.15	63.0		6-7	27.90
2-8				65.8		6-8	32.56
2-9				66.4		6-9	32.45
2-10				65.6		6-10	32.15
2-11				64.4		6-11	31.92
2-12				64.6		6-12	32.02
2-13		0.25	0.25	66.1		6-13	33.11
2-14				63.8		6-14	32.89
2-15				66.7		6-15	32.80
2-16				68.3		6-16	33.00
2-17				68.6		6-17	32.31
2-18				61.0		6-18	-
2-19		0.50	0.50	69.4		6-19	32.94
2-20				69.9		6-20	30.42
2-21				69.8		6-21	33.36
2-22				68.6		6-22	33.42
2-23				70.5		6-23	33.57
2-24				70.6		6-24	33.57
2-25		1.0	1.0	-		6-25	34.67
2-26				71.8		6-26	32.06
2-27				71.8		6-27	34.96
2-28				73.9		6-28	34.85
2-29	73.8			6-29	34.20		
2-30	71.7			6-30	34.28		
2-31	2.0	2.0	74.8	6-31	35.23		
2-32			-	6-32	34.39		
2-33			75.0	6-33	35.58		
2-34			76.8	6-34	34.90		
2-35			75.1	6-35	35.12		
2-36			74.6	6-36	35.97		
2-37	-30	0	37.1	6-37	-120	0	13.91
2-38			33.6	6-38			22.98
2-39			38.5	6-39			21.52
2-40		0.15	0.15	36.0		6-40	22.49
2-41				63.1		6-41	29.00
2-42				65.4		6-42	32.54

2-43			64.1	6-43			28.23				
2-44			62.1	6-44			31.24				
2-45			0.25				63.6	6-45	0.25	33.37	
2-46							63.4	6-46		33.65	
2-47							61.6	6-47		33.01	
2-48							59.2	6-48		32.23	
2-49			0.50				66.9	6-49	0.50	34.65	
2-50							69.3	6-50		34.11	
2-51							70.3	6-51		33.88	
2-52							67.3	6-52		33.71	
2-53			1.0				73.2	6-53	1.0	36.11	
2-54							72.9	6-54		33.63	
2-55							70.0	6-55		34.37	
2-56							73.7	6-56		34.95	
2-57			2.0				79.1	6-57	2.0	30.32	
2-58							76.3	6-58		37.60	
2-59							77.9	6-59		36.35	
2-60							78.9	6-60		36.63	
2-61			-50				0	6-61	-140	0	11.15
2-62											38.2
2-63	34.6	6-63			15.45						
2-64	34.9	6-64			16.21						
2-65	0.15				59.9	6-65	0.15	26.87			
2-66					58.5	6-66		23.65			
2-67					65.2	6-67		29.97			
2-68					64.2	6-68		23.55			
2-69	0.25				57.0	6-69	0.25	27.74			
2-70					58.0	6-70		29.85			
2-71					57.4	6-71		32.34			
2-72					53.6	6-72		28.34			
2-73	0.50				61.5	6-73	0.50	35.12			
2-74					61.1	6-74		25.13			
2-75					69.8	6-75		26.22			
2-76					69.2	6-76		35.47			
2-77	1.0				59.5	6-77	1.0	36.80			
2-78					66.3	6-78		36.64			
2-79					63.5	6-79		33.82			
2-80					72.5	6-80		36.76			
2-81	2.0		80.8	6-81	2.0	37.34					
2-82			80.3	6-82		37.33					
2-83			79.8	6-83		36.86					
2-84			78.9	6-84		36.75					

Tabla 2. Propiedades de los materiales utilizadas en los cálculos.

	S275JR		S690Q	
$\sigma_Y$ (MPa)	-10 °C	337	-100 °C	907
	-30 °C	344	-120 °C	949
	-50 °C	349	-140 °C	1004
$\sigma_u$ (MPa)	-10 °C	536	-100 °C	1015
	-30 °C	548	-120 °C	1060
	-50 °C	564	-140 °C	1111
<b>E</b> (GPa)	-10 °C	207.0	-100 °C	212.0
	-30 °C	208.0	-120 °C	213.2
	-50 °C	209.0	-140 °C	214.4
<b>T<sub>0</sub></b> (°C)		-26.0		-110.8
<b>L</b> (mm)		0.0064		0.0115

Las figuras 2 y 3 muestran los resultados para los aceros S275JR y S690Q respectivamente.

Los resultados en el acero S275JR revelan que la metodología propuesta reduce de forma significativa el conservadurismo del análisis, dado que los puntos de evaluación de las probetas en rotura se localizan mucho más próximos a la condición de rotura (representada por la FAL) una vez que se aplica la corrección por efecto entalla. La mejora es más destacable a -50°C. Igualmente, es importante advertir que a pesar del conservadurismo obtenido (medido como la distancia entre el punto de evaluación y la FAL) se reduce notablemente, no hay evaluaciones inseguras (es decir, ninguna de las probetas en el momento del fallo queda representada por un punto localizado en la zona segura del FAD).

Con respecto a los resultados obtenidos en el acero S690Q, éstos muestran igualmente grandes mejoras en las predicciones de rotura a las tres temperaturas de ensayo. Los resultados son incluso más ajustados que los obtenidos en el caso anterior (i.e., los puntos de evaluación quedan más próximos a la FAL), si bien esto viene acompañado por la obtención de tres resultados inseguros o no conservadores, en los cuales las probetas quedan evaluadas en el momento del fallo por puntos situados en la zona segura del FAD.

Con todo ello puede asegurarse que la metodología propuesta en este trabajo para la evaluación de la integridad estructural de aceros ferríticos entallados que operan en la ZTDF, proporciona mejoras sustanciales con respecto a la evaluación de entallas como si fueran fisuras. Una vez que la metodología es aplicada los puntos de evaluación quedan localizados generalmente próximos a la FAL, y parecen incluso seguir la forma de la misma, demostrando que dicha metodología predice y capta de forma adecuada la física del problema. Tan solo 3 de los 164 resultados obtenidos han quedado del lado de la inseguridad.

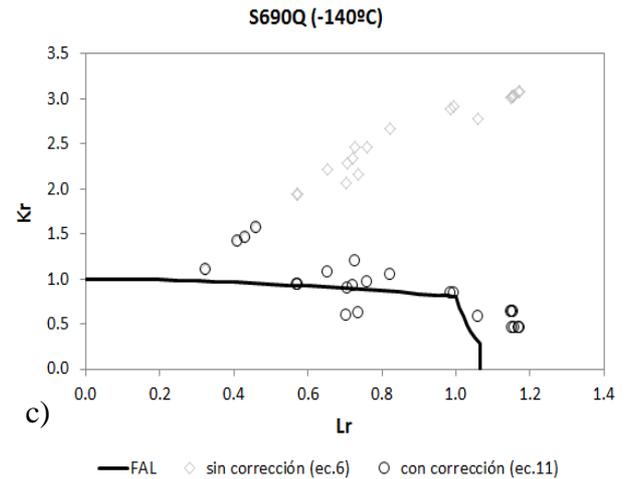
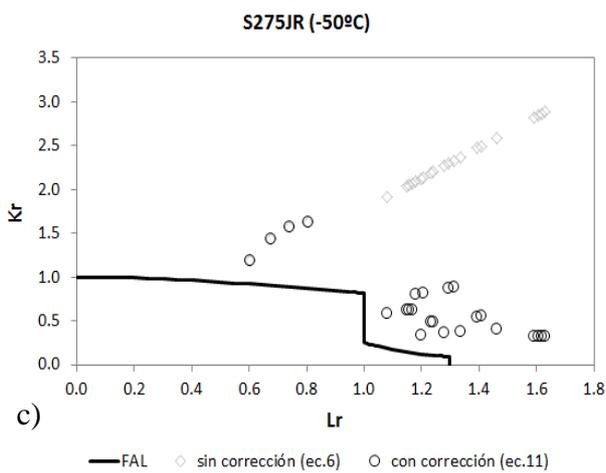
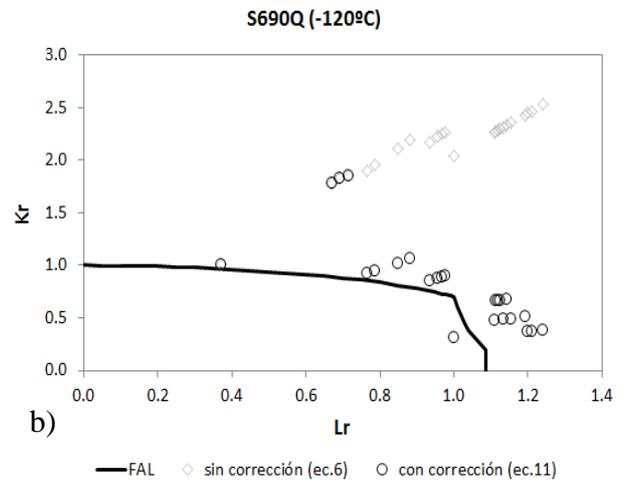
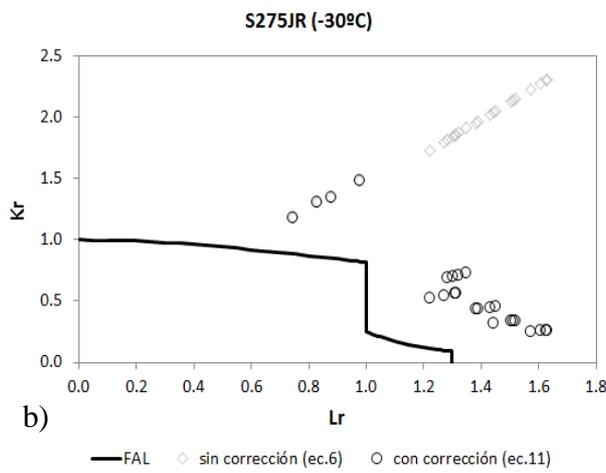
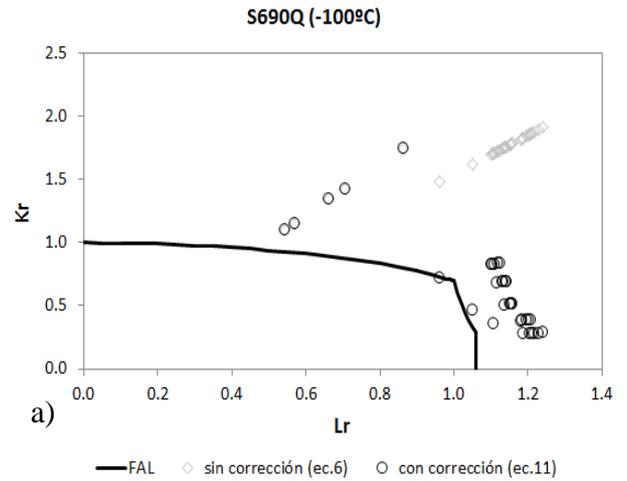
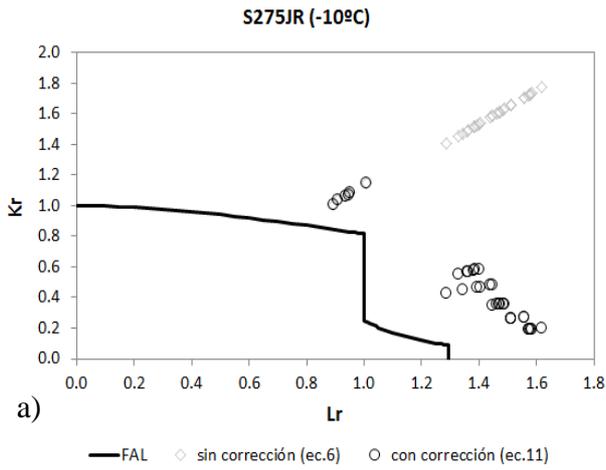


Fig. 2. Resultados del análisis FAD con y sin correcciones por efecto entalla. Acero S275JR. a) -10°C; b) -30°C; c) -50°C

Fig. 3. Resultados del análisis FAD con y sin correcciones por efecto entalla. Acero S690Q. a) -100°C; b) -120°C; c) -140°C

## 5. CONCLUSIONES

Este artículo presenta una metodología de análisis de aceros ferríticos entallados que operan en la zona de transición dúctil-frágil. Se basa en el uso de Diagramas de Fallo y mantiene las mismas soluciones de Línea de Fallo,  $K_I$  y  $P_L$  que los utilizados en el caso de fisuras. La corrección por efecto entalla y el efecto de la temperatura se tienen en cuenta mediante el uso de la Curva Maestra de Entallas, que combina la Curva Maestra con las correcciones de entalla proporcionadas por la Teoría de las Distancias Críticas.

La metodología se ha aplicado sobre 164 ensayos, combinando 2 aceros, 6 radios de entalla, 2 tipos de probetas y 3 temperaturas en cada zona de transición. Ha quedado demostrado que la metodología propuesta mejora los resultados obtenidos en ausencia de correcciones por entalla. La precisión de las predicciones aumenta y la metodología capta la física del problema analizado, ya que los puntos de evaluación se acercan a la Línea de Fallo y siguen su forma. Solo 3 de los 164 resultados han sido inseguros.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España la financiación del proyecto MAT2010-15721: “Análisis de Integridad Estructural en Defectos Tipo Entalla”, 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, 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, *Int. J. of Fracture* **3**, 247-252, 1967.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] S. Cicero, F. Gutiérrez-Solana, A.J. Horn, Experimental Analysis of Differences in Mechanical Behaviour of Cracked and Notched Specimens in a Ferritic-Pearlitic Steel: Considerations about the Notch Effect on Structural Integrity, *Engineering Failure Analysis* **16**, 2450-2466, 2009.
- [10] A.J. Horn, A.H., Sherry, Predictions of cleavage fracture from non-sharp defects using the Weibull stress based toughness scaling model, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **87**, 670-680, 2010.
- [11] K. Wallin, The scatter in  $K_{Ic}$  results, *Engineering Fracture Mechanics* **19**, 1085-1093, 1984.
- [12] ASTM 1921-13, Test Method for the Determination of Reference Temperature  $T_0$  for Ferritic Steels in the Transition Range, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Estados Unidos, 2013.
- [13] S. Cicero, T. García, V. Madrazo, I.A. Carrascal, J. Cuervo, Análisis del efecto entalla en la curva de transición dúctil-frágil del acero S355J2, *Anales de Mecánica de la Fractura* **30**, 279-285, 2013.
- [14] S. Cicero, T. García, V. Madrazo, Análisis del efecto entalla en la curva de transición dúctil-frágil del acero S275JR, *Anales de Mecánica de la Fractura* **31**, 347-352, 2014.
- [15] A.G. Miller, Review of limit loads of structures containing defects, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **32**, 197-327, 1988.
- [16] A.J. Horn, A.H., Sherry, An engineering assessment methodology for non-sharp defects in steel structures - Part I: Procedure development, *Int. J. Press. Vess. Pip.* **89**, 137-150, 2012.
- [17] BS 7910:2013, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures, British Standard Institution, London, 2013.
- [18] T.L. Anderson, Fracture mechanics: Fundamentals and applications, CRC Press, Florida, 2005.