

USO DE LA OPCIÓN 1 DEL DIAGRAMA DE FALLO PROPUESTO POR LA BRITISH STANDARD 7910 EN MATERIALES POLIMÉRICOS Y COMPUESTOS

J.D. Fuentes*, S. Cicero, F.T. Ibáñez-Gutiérrez, I. Procopio

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales (Universidad de Cantabria)
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Avda. De los Castros, 39005, Santander

* E-mail: fuentesjd@unican.es

RESUMEN

En este artículo se establece una metodología para realizar evaluaciones de integridad estructural de materiales poliméricos y compuestos. El planteamiento se basa en el uso de la Opción 1 del Diagrama de Fallo (FAD) recogido en la British Standard 7910, originalmente propuesto para el análisis de la fractura – colapso plástico de materiales metálicos. La metodología se ha aplicado a 33 probetas de fractura, combinando 7 materiales diferentes, integrando polímeros y materiales compuestos. Los resultados obtenidos validan la metodología de evaluación propuesta y demuestran que es segura para los materiales analizados.

PALABRAS CLAVE: Criterio de fallo, Mecánica de la Fractura, Integridad Estructural, polímeros, compuestos

ABSTRACT

This paper provides a structural integrity assessment methodology for the analysis of polymers and composites. The approach uses the British Standard 7910 Option 1 Failure Assessment Diagram, originally proposed for the fracture-plastic collapse assessment of metallic materials. The methodology has been applied to 33 fracture specimens, combining 7 different materials and covering polymers and composites. The results obtained validate the proposed assessment methodology and demonstrate its safety for the materials analysed here.

KEYWORDS: Failure criterion, Fracture Mechanics, Structural Integrity, polymers, composites

1. INTRODUCCIÓN

Un gran número de fallos estructurales está asociado a la presencia de defectos tipo fisura en las estructuras. Para evitar o predecir dichos fallos, los procedimientos de evaluación de integridad estructural [1-4] hacen uso de los conceptos de la mecánica de la fractura y de herramientas derivadas de los mismos, como pueden ser los Diagramas de Fallo (FADs).

Hasta ahora, la mayoría de los procedimientos de evaluación de integridad estructural solo han tratado la predicción de la fractura-colapso plástico de materiales metálicos, aunque el incremento en el uso de nuevos materiales no metálicos como polímeros y materiales compuestos en aplicaciones estructurales, hace que sea necesario desarrollar nuevas herramientas de evaluación de integridad estructural para este tipo de materiales.

Este trabajo proporciona una justificación teórica para el uso de la Opción 1 del Diagrama de Fallo propuesto por la British Standard 7910 [2] (también recogido en el procedimiento SINTAP y FITNET FSS), además de evaluar su uso en varios materiales no metálicos.

2. PROGRAMAS EXPERIMENTAL

2.1. Diagrama de Fallo (FAD)

Los Diagramas de Fallo son una de las principales herramientas de ingeniería para la evaluación de la fractura-colapso plástico en elementos fisurados [1-4]. Estos diagramas permiten realizar simultáneamente el análisis de la fractura y del colapso plástico mediante el uso de dos parámetros normalizados, K_r y L_r , cuyas expresiones son:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (1)$$

$$L_r = \frac{P}{P_L} \quad (2)$$

K_r evalúa al componente frente a la fractura y se define como la relación entre el factor de intensidad de tensiones, K_I , y la resistencia a fractura del material, K_{mat} [5,6]. Por otro lado, L_r evalúa al componente frente al colapso plástico y se define como la relación entre la carga aplicada, P , y la carga de colapso plástico, P_L .

Una vez que el punto de evaluación que representa al componente fisurado es descrito por las coordenadas K_r y L_r , es necesario definir las condiciones límite, que vienen marcadas por la Línea de Fallo (FAL). Si el punto se sitúa por encima de la Línea de Fallo, se considera que el componente se encuentra en condiciones no seguras, mientras que, si se sitúa por debajo, se considera que está en condiciones seguras. Por último, si el punto se sitúa sobre la Línea de Fallo, se considera que el componente se encuentra en situación crítica (condición de fallo) [1], ver Figura 1.

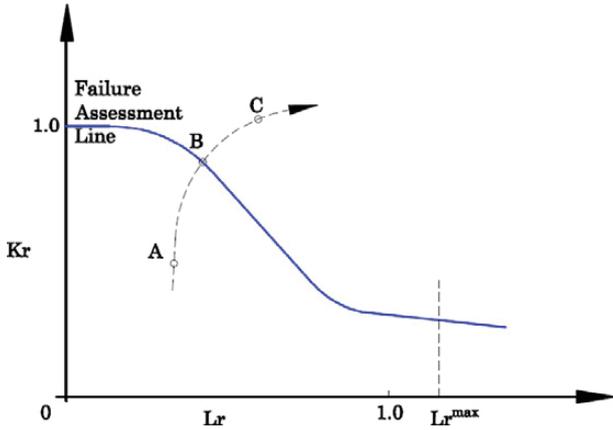


Figura 1. Análisis del Diagrama de Fallo en iniciación [1], mostrando 3 posibles situaciones: A, condición segura; B, situación crítica; C, condición no segura.

2.2. Opciones de análisis de la BS 7910

La expresión general de la Línea de Fallo propuesta en la BS 7910 y en otros procedimientos es:

$$K_r = f(L_r) \tag{3}$$

Las funciones $f(L_r)$ son realmente correcciones por plasticidad de las evaluaciones de fractura ($K_I = K_{mat}$), cuya expresión analítica exacta es:

$$f(L_r) = \sqrt{\frac{J_e}{J}} \tag{4}$$

Esta Línea de Fallo corresponde a la Opción 3 de análisis de la BS 7910 [2] y a la Opción 4 del procedimiento FITNET FFS [1,7]. En la práctica, los procedimientos de evaluación de integridad estructural [1-4] ofrecen soluciones aproximadas, definidas a través de las propiedades de tracción del material. Estas aproximaciones, generalmente se ofrecen de forma jerárquica, es decir, definiendo diferentes niveles donde cuanto mejor definida está la curva tensión-deformación, más exacta es la solución.

La Opción 1 de la BS 7910 [2] requiere conocer el valor del límite elástico y la tensión de rotura del material. La Opción 1 se corresponde con el análisis más simple que propone la BS 7910 y, en práctica, es el más empleado en

la industria. Para materiales sin escalón de cedencia, la Opción 1 propuesta por la BS 7910 se define mediante las ecuaciones (5)-(9) (Este FAD coincide a su vez con la Opción 1 del procedimiento FITNET FFS [1]).

$$K_r = f(L_r) = \left[1 + \frac{1}{2}(L_r)^2\right]^{-1/2} \cdot [0.3 + 0.7e^{-\mu \cdot (L_r)^6}] \tag{5}$$

$$L_r \leq 1$$

$$K_r = f(L_r) = f(1) \cdot L_r^{\frac{N-1}{2N}} \tag{6}$$

$$1 < L_r < L_{r,max}$$

$$K_r = f(L_r) = 0 \tag{7}$$

$$L_r = L_{r,max} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2\sigma_y}$$

$$\mu = \min \left[0.001 \cdot \frac{E}{\sigma_y}; 0.6\right] \tag{8}$$

$$N = 0.3 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right) \tag{9}$$

Los parámetros μ y N quedan definidos por las ecuaciones (8) y (9) y han sido calibrados y validados para materiales metálicos [8-11], pero no para materiales no metálicos. Esta es la principal razón por la que los procedimientos de evaluación de integridad estructural no cubren la evaluación en fractura de materiales poliméricos y compuestos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La posibilidad de usar los Diagramas de Fallo para las evaluaciones de integridad estructural de materiales no metálicos ha sido analizada en los siguientes materiales:

- PMMA: 3 probetas de flexión en 3 puntos (SENB) [12,13], ver Figura 2.
- Poliamida 6: 5 probetas de flexión en 3 puntos (SENB) [14], ver Figura 2.
- Poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio corta seca: Se han analizado 5 probetas de flexión en 3 puntos (SENB) [14] (Figura 2) para cada cantidad de fibra de vidrio corta añadida (5% - 10% - 30% - 50% en peso)
- Poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio corta (10% en peso) y 2% de humedad: 5 probetas de flexión en 3 puntos (SENB) (Figura 2).

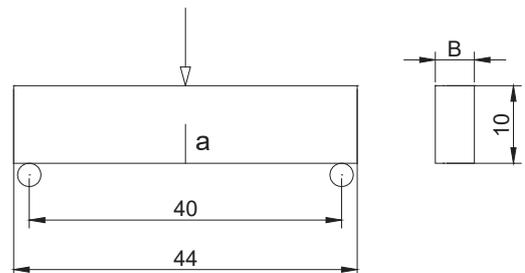


Figura 2. Probeta de flexión en 3 puntos, B = 4 mm en PA6 y SGFR-PA6; B = 5 mm en PMMA

Las propiedades mecánicas de cada material están recogidas en la Tabla 1. Para obtener las propiedades mecánicas del PMMA y de todas las combinaciones de poliamida 6, se han realizado dos ensayos de tracción para cada material, según la ASTM D638 [13].

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los diferentes materiales ensayados

Material	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_u (MPa)	E (GPa)
PMMA	48.50	72.00	3.40
PA6	54.20	54.20	2.90
SGFR-PA6 (5)	66.90	72.10	3.30
SGFR-PA6 (10)	70.20	78.20	3.60
SGFR-PA6 (30)	105.40	128.00	6.50
SGFR-PA6 (50)	161.20	192.80	12.60
SGFR-PA6 (10) (2)	29.40	63.15	2.0

La tenacidad a fractura se obtuvo según [15]. En la Figura 3, se muestran los valores de resistencia a fractura de los diferentes materiales analizados.

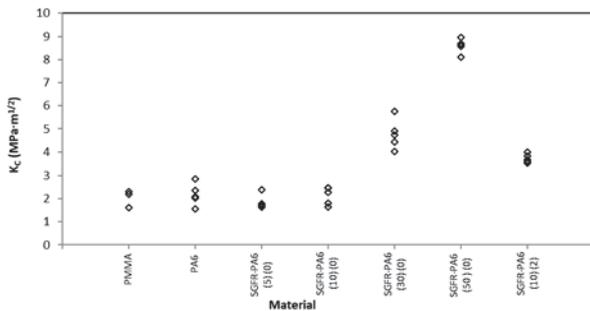


Figura 3. Resistencia a fractura de los diferentes materiales analizados

4. DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FALLO OPCIÓN 1 DE LA BS 7910 PARA MATERIALES NO METÁLICOS

Del mismo modo que se hizo para los materiales metálicos, los parámetros μ y N , empleados en la Opción 1 del FAD propuesto por la BS 7910 [2], deben ser definidos para materiales poliméricos y compuestos.

Para caracterizar μ , la ecuación (8) garantiza que los resultados obtenidos mediante la Opción 1 del FAD de la BS 7910 [2] son más conservadores que aquellos obtenidos mediante la solución analítica proporcionada por el FAD Opción 2 de la BS 7910. El valor exacto de μ puede obtenerse aplicando las siguientes ecuaciones [8,9]:

$$\left[\frac{3}{2}\right]^{-1/2} \cdot [0.3 + 0.7e^{-\mu}] \leq \left[\beta + \frac{1}{2\beta}\right]^{-1/2} \quad (10)$$

$$\beta = 1 + \frac{E}{\sigma_y} \cdot 0.002 \quad (11)$$

En la Figura 4 se muestran los valores de la estimación segura asociada a la Opción 1 de la BS 7910 y los puntos correspondientes a los materiales analizados.

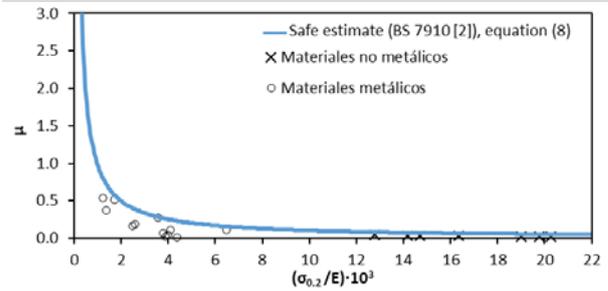


Figura 4. Estimaciones proporcionadas por la ecuación (8) y valores experimentales de μ

De igual modo, la ecuación (9) define una envolvente inferior del coeficiente de endurecimiento (N) de un determinado número de aceros [9]. Los resultados experimentales del coeficiente de endurecimiento para los materiales estudiados se han obtenido usando la ecuación de Hollomon. En la Figura 5 se puede observar que los resultados obtenidos son más conservadores que los propuestos por Ruiz Ocejo et. al [10].

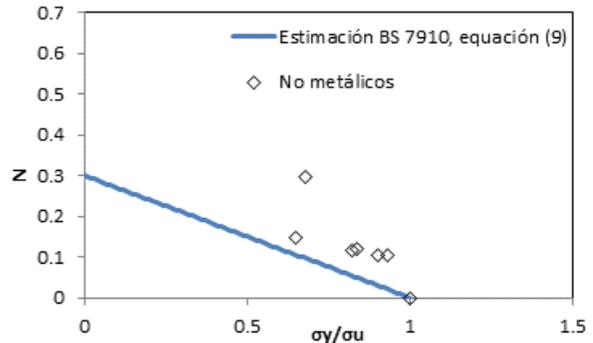


Figura 5. Definición de N frente a la relación límite elástico/tensión de rotura

Con todo esto, se puede concluir que ambas ecuaciones (8) y (9) proporcionan estimaciones conservadoras de μ y N en los materiales poliméricos y compuestos analizados. Por tanto, el empleo de la Opción 1 del FAD de la BS 7910 es seguro para tales materiales.

5. VALIDACIÓN: ANÁLISIS DE MATERIALES NO METÁLICOS USANDO LA OPCÓN 1 DE LA BS 7910

En los apartados anteriores han quedado definidos los valores de K_r (ecuación (1)) y L_r (ecuación (2)), y se han obtenido los valores de K_I para las probetas de flexión en 3 puntos según la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Por otro lado, los valores de K_{mat} que generalmente se consideran en las evaluaciones de integridad estructural, se corresponden con aquellos que tienen un nivel de confianza del 95% (o similar). Esto, asumiendo una

distribución normal, es igual a la media (promedio de los valores experimentales de la resistencia a fractura para cada material) menos 1.645 veces la desviación típica de los valores de K_{mat} obtenidos experimentalmente para cada material (ecuación (12)).

$$K_{mat95\%} = K_{mat,prom} - 1.645 \text{ desv}(K_{mat}) \quad (12)$$

La carga aplicada (P) se corresponde con la carga de rotura de las probetas obtenida en los ensayos (Tabla 2), mientras que para obtener la carga de colapso plástico P_L se debe distinguir si la rotura se produce en condiciones de tensión plana o de deformación plana.

En caso de encontrarnos en condiciones de deformación plana, definidas por la ecuación (13) [16], el valor de la carga de colapso plástico viene dado por la ecuación (14):

$$K_{mat} < \sigma_y \left(\frac{B}{2.5}\right)^{1/2} \quad (13)$$

$$P_L = \frac{1.408 \left(1 - \frac{a}{W}\right)^2 W^2 B \sigma_y}{S} \quad (14)$$

Si dominan las condiciones de tensión plana [17] (ecuación (15)), el valor de la carga de colapso plástico viene definido por la ecuación (16).

$$K_{mat} > \sigma_y (\pi B)^{1/2} \quad (15)$$

$$P_L = \frac{1.072 \left(1 - \frac{a}{W}\right)^2 W^2 B \sigma_y}{S} \quad (16)$$

Estas dos soluciones de P_L se han obtenido del procedimiento R6 [3], ya que la BS 7910 [2] no proporciona soluciones explícitas de la carga de colapso plástico para probetas de flexión.

Si el valor de K_{mat} está localizado entre las condiciones de tensión plana y de deformación plana, el valor de P_L debe obtenerse interpolando entre ambos valores (tensión plana y deformación plana).

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos de las evaluaciones de integridad estructural de los 7 materiales estudiados cuando se aplica la metodología del FAD. Todos los puntos evaluados en rotura, corresponden a evaluaciones de integridad estructural seguros, ya que no hay ningún punto de evaluación dentro del área segura. Por tanto, para los materiales analizados en este trabajo, las evaluaciones de integridad estructural realizadas usando la Opción 1 del FAD propuesto por la BS 7910 han proporcionado resultados seguros.

Tabla 2. Carga de rotura de las diferentes probetas analizadas

Material	Probeta	Carga de rotura (N)
PMMA	1	130.0
	2	83.0
	3	131.2
PA6	1	92.0
	2	66.2
	3	110.5
	4	93.2
	5	83.1
SGFR-PA6 (5) (0)	1	100.5
	2	69.6
	3	73.3
	4	72.0
	5	69.0
SGFR-PA6 (10) (0)	1	117.5
	2	107.2
	3	70.2
	4	76.7
	5	95.9
SGFR-PA6 (30) (0)	1	253.5
	2	195.5
	3	195.7
	4	171.7
	5	180.1
SGFR-PA6 (50) (0)	1	348.7
	2	351.8
	3	331.8
	4	346.4
	5	369.4
SGFR-PA6 (10) (2)	1	157.9
	2	160.7
	3	173.8
	4	161.1
	5	188.1

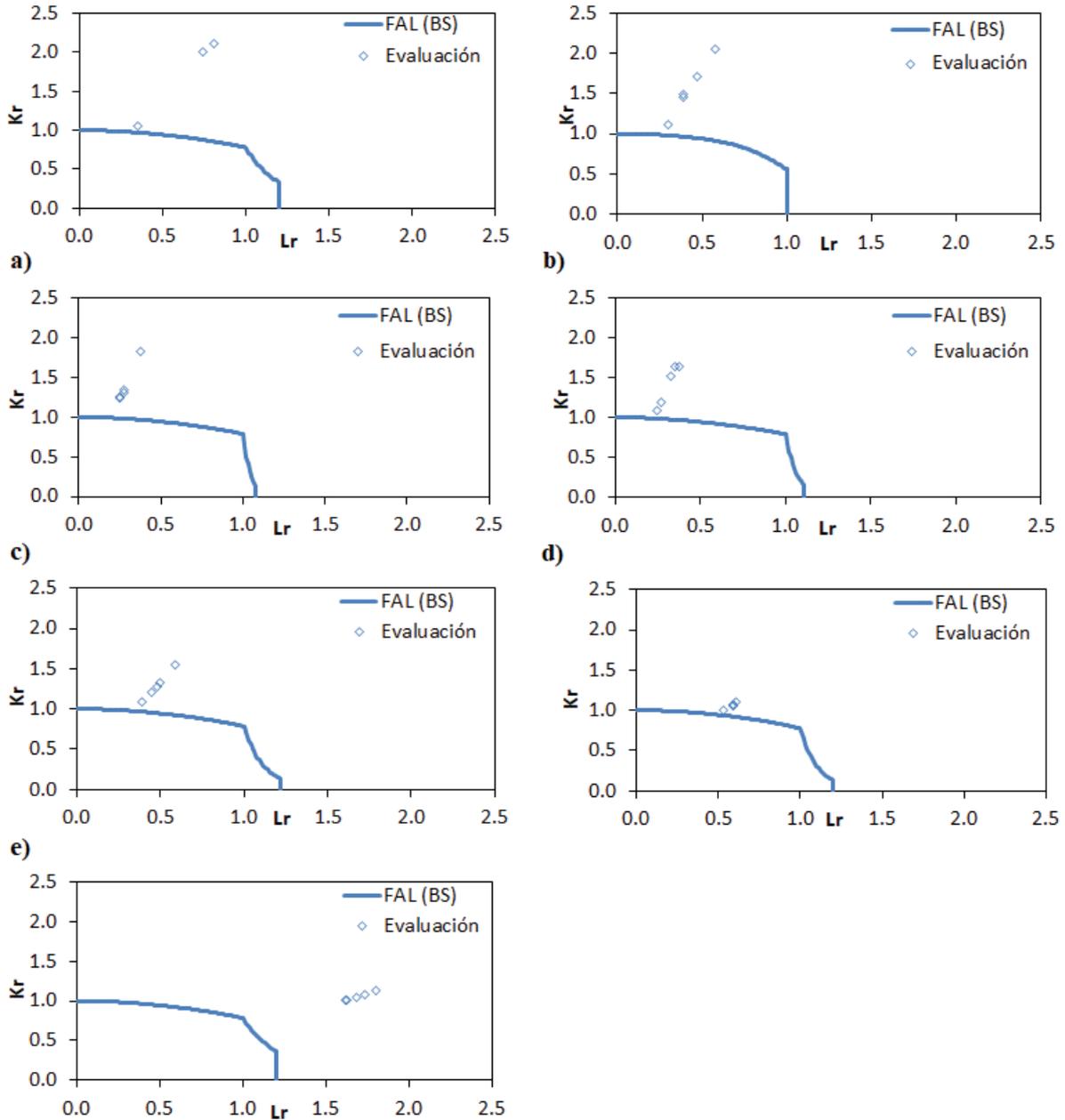


Figura 6. Análisis según Opción 1 del FAD de la BS 7910. a) PMMA; b) PA6; c) SGFR-PA6 (5) (0); d) SGFR-PA6 (10) (0); e) SGFR-PA6 (30) (0); f) SGFR-PA6 (50) (0); g) SGFR-PA6 (10) (2)

6. CONCLUSIONES

Este artículo propone el empleo de la Opción 1 del FAD de la BS 7910 para realizar evaluaciones de integridad estructural de materiales no metálicos, validando su uso en 7 materiales diferentes. Este FAD fue originalmente propuesto para materiales metálicos, por lo que su aplicación en materiales no metálicos requiere justificación y validación. El programa experimental se compone de 33 probetas de fractura, combinando 7 materiales no metálicos diferentes como PMMA, PA6, SGFR-PA6 (5, 10, 30 y 50 % en peso) seca y SGFR-PA6 (10 % en peso) con 2 % de humedad.

Se ha demostrado que los valores de los parámetros de ajuste de la Opción 1 del FAD (μ y N) de la BS 7910, originalmente definidos para materiales metálicos, pueden ser empleados para los materiales no metálicos analizados en este artículo, ofreciendo estimaciones seguras de sus valores reales. Por tanto, las ecuaciones de ajuste usadas en la BS 7910 para materiales metálicos, se pueden emplear para los materiales estudiados en este trabajo.

La aplicación de la Opción 1 del FAD de la BS 7910 para las evaluaciones de integridad estructural de los materiales analizados (polímeros y compuestos) ha

devuelto resultados seguros. Ninguno de los puntos en rotura se localiza en zona segura.

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] Kocak M, Webster S, Janosch J, Ainsworth R, Koers R, FITNET fitness-for-service (FFS). Procedure vol. 1. Hamburg; GKSS, 2008.
- [2] BS 7910:2013. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. London; British Standard Institution, 2013.
- [3] R6. Assessment of the integrity of structures containing defects. British Energy Generation Limited. Rev 4, 2007.
- [4] API 579-1/ASME FFS-1. Fitness-for service. American Society of Mechanical Engineers, 2007.
- [5] ASTM E399-12e3, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2012.
- [6] ASTM E1820-15ae1, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2015.
- [7] Gutiérrez-Solana F, Cicero S, FITNET FFS procedure: A unified European procedure for structural integrity assessment. *Eng Fail Anal* 2009; 16(2):557-577.
- [8] Ruiz Oejo J, Gutiérrez-Solana F, González-Pereda MA, Report/SINTAP/UC/06: Structural integrity assessment procedures for European industry (SINTAP). Santander, 1998.
- [9] Ainsworth RA, Gutiérrez-Solana F, Ruiz Oejo J, Analysis levels with the SINTAP defect assessment procedures. *Eng Fract Anal* 2000; 67:515-527.
- [10] Ruiz Oejo J, Gutiérrez-Solana F, González-Pereda MA, Report/SINTAP/UC/08: Structural integrity assessment procedures for European industry (SINTAP). Santander, 1998.
- [11] Bannister AC, Ruiz Oejo J, Gutiérrez-Solana F, Implications of the yield stress/tensile stress ratio to the SINTAP failure assessment diagrams for homogeneous materials. *Eng Fract Anal* 2000; 67:547-562.
- [12] Cicero S, Madrazo V, Carrascal IA, Analysis of notch effect in PMMA by using the Theory of Critical Distances. *Eng Fract Mech* 2012; 86:56–72.
- [13] ASTM D638-10. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 08.03. Philadelphia; American Society for Testing and Materials, 2004.
- [14] Ibáñez-Gutiérrez FT, Cicero S, Carrascal IA, Procopio I, Effect of fibre content and notch radius in the fracture behaviour of short glass fibre reinforced Polyamide 6: an approach from the Theory of Critical Distances. *Compos Part B Eng* 2016; 94:299-311.
- [15] ASTM D5045-99 (2007) e1. Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials. Annual Book of ASTM Standards. Vol. 08.03. Philadelphia; American Society for Testing and Materials, 2007.
- [16] Taylor D, The Theory of Critical Distances: A New Perspective in Fracture Mechanics. London; Elsevier, 2007.
- [17] Anderson TL, Fracture mechanics: fundamentals and applications. Florida; CRC Press, 2005.