

APLIACIÓN DEL DIAGRAMA DE FALLO A PLACAS DE PLA REFORZADO CON GRAFENO FABRICADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

S. Cicero ^{1*}, S. Arrieta ¹, M. Sánchez ¹

¹ LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av. Los Castros 44, 39005 Santander, España

* Persona de contacto: sergio.cicero@unican.es

RESUMEN

Los diagramas de fallo (*Failure Assessment Diagrams*, FADs) son una herramienta empleada en la evaluación de la integridad estructural de componentes estructurales agrietados, analizando simultáneamente su comportamiento frente a fractura y frente a colapso plástico. Los componentes fabricados mediante impresión 3D, particularmente los obtenidos a partir de filamentos de polímeros fundidos, están asumiendo cada vez más exigencias estructurales, más allá de su tradicional uso para prototipos. Los componentes estructurales fabricados por este método, al igual que los fabricados por procesos convencionales, pueden contener defectos tipo entalla (poros, ranuras, esquinas, agujeros, etc.) que comprometan su integridad estructural, lo que hace necesaria su evaluación de integridad mediante el uso de procedimientos específicos que tengan en cuenta el efecto entalla. Este trabajo propone el uso de la Opción 1 del Diagrama de Fallo recogido en la norma BS7910, junto con una corrección del efecto entalla proporcionada por la Teoría de las Distancias Críticas (TDC), para analizar placas de PLA reforzado con grafeno fabricadas por impresión 3D, sometidas a cargas de tracción pura y que contienen entallas en U y V. Los resultados obtenidos validan esta metodología ya que los puntos que representan la rotura se encuentran en la zona de condiciones inseguras del FAD, con un conservadurismo razonable.

PALABRAS CLAVE: Integridad Estructural, Diagrama de Fallo, Impresión 3D, PLA reforzado con grafeno.

ABSTRACT

Failure Assessment Diagrams (FADs) are tools to evaluate the structural integrity of cracked structural components, analyzing their process of fracture and plastic collapse simultaneously. 3D printing manufactured components, particularly those obtained from fused polymer filaments, are assuming more structural demands, beyond their traditional use for prototypes. Structural components manufactured by this method, like those made by conventional processes, may contain notch-type defects (pores, grooves, corners, holes, etc.) that compromise their structural integrity. This makes to evaluate their integrity using procedures that take into account the notch effect mandatory. This work proposes the use of Option 1 of the FADs included in BS7910, together with a correction for the notch effect using the Theory of Critical Distances (TCD), to analyze graphene-reinforced PLA plates manufactured by 3D printing, subjected to pure tensile loads and containing U and V notches. The results validate this methodology since the points that represent the fracture are located in the FAD unsafe conditions zone, with enough conservatism.

KEYWORDS: Structural Integrity, Failure Assessment Diagram, 3D Printing, graphene-reinforced PLA.

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de componentes estructurales que contienen defectos tipo fisura generalmente se realiza mediante la aplicación de procedimientos de evaluación de integridad estructural, por ejemplo, la norma BS7910 [1], que generalmente se basan en los diagramas de fallo (*Failure Assessment Diagrams*, FADs). Dichos diagramas permiten un análisis simultáneo de la fractura y del colapso plástico a través de dos parámetros normalizados, K_r y L_r :

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

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

donde K_I es el factor de intensidad de tensión, K_{mat} es la tenacidad a la fractura, P es la carga aplicada, P_L es la carga límite, σ_y es el límite elástico y σ_{ref} es la tensión de referencia. Los procedimientos de evaluación proporcionan soluciones analíticas para K_I y P_L (o σ_{ref}) para una amplia variedad de geometrías y grietas. Al observar las ecuaciones (1) y (2), se puede inferir que K_r

evalúa el componente frente a la fractura y L_r evalúa el componente frente al colapso plástico, definiendo ambos el punto de evaluación en el FAD. La ubicación del mismo se compara con las condiciones críticas definidas por la línea de fallo (*Failure Assessment Line*, FAL): cuando el punto de evaluación se ubica por encima de la FAL, el componente está en condiciones inseguras, mientras que, si el punto está bajo el FAL, se encuentra en condiciones seguras. Finalmente, las condiciones de fallo se cumplen cuando el punto se encuentra sobre la línea de fallo.

En la práctica, hay situaciones (e.g., daño mecánico, defectos de corrosión, agujeros, soldaduras, etc.) en las que los defectos que ponen en peligro la integridad estructural no son defectos asimilables a fisuras. En estos casos, puede ser demasiado conservador asumir que se comportan como tales y, en consecuencia, aplicar análisis de mecánica de la fractura. La literatura demuestra [2,3] cómo los componentes con defectos no afilados (entallas) desarrollan una tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) mayor que la desarrollada en condiciones fisuradas, lo que influye en la capacidad de soportar cargas. El análisis del comportamiento a fractura de materiales entallados se puede realizar utilizando la Teoría de Distancias Críticas (TDC), que puede proporcionar criterios de evaluación de integridad estructural para componentes que contienen defectos de tipo entalla [4].

Además, los procedimientos de evaluación de integridad estructural, generalmente, abordan la evaluación de materiales metálicos, sin cubrir materiales no metálicos. Sin embargo, el modelado por deposición fundida (*Fused Deposition Modeling*, FDM) es una tecnología que permite fabricar geometrías complejas y es aplicable a una amplia variedad de materiales. Consiste en extruir un filamento fundido a través de una boquilla caliente, que luego se deposita sobre una plataforma, capa por capa, hasta fabricar el componente final [5]. Hasta la fecha, el FDM con polímeros se ha utilizado para la creación de prototipos, pero no para fabricar componentes estructurales. Con el objetivo de mejorar el rendimiento mecánico de las piezas FDM, se han realizado importantes esfuerzos de investigación para mejorar el conocimiento sobre esta técnica y los materiales impresos resultantes [6,7]. En consecuencia, los materiales (compuestos) de matriz polimérica FDM están asumiendo cada vez más responsabilidades estructurales y existe la necesidad de desarrollar procedimientos de evaluación de integridad estructural específicos para este tipo de materiales cuando contienen tanto entallas como defectos tipo fisura. Anteriormente, se ha analizado el uso combinado de FADs y la TDC en la evaluación de probetas entalladas tipo SENB fabricadas con polímeros y compuestos de matriz polimérica por FDM, y en en placas entalladas de matriz polimérica de mayores dimensiones [8,9].

Este trabajo analiza la integridad estructural de placas de PLA reforzado con grafeno fabricadas mediante FDM

que contienen entallas en U y en V, abordando el análisis mediante el uso combinado de los FADs y la TDC. Los resultados obtenidos demuestran que el enfoque propuesto genera evaluaciones de integridad estructural seguras y razonablemente conservadoras en este material.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales

El material investigado es PLA reforzado con grafeno (PLA-Gr, 1% en peso), suministrado como filamentos para ser utilizado directamente en el proceso de impresión FDM. Las principales propiedades mecánicas se recogen en la Tabla 1, (ver [10], para más detalles).

Tabla 1. Propiedades a tracción y fractura. E : módulo de Young; σ_y : límite elástico; σ_u : resistencia a la tracción; ϵ_u : deformación bajo máxima carga. Parámetros de la TDC: L : distancia crítica.

E (MPa)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	L (mm)	K_{mat} (MPam ^{1/2})
3972	47.5	49.0	1.5	1.06	7.2

Las placas fueron fabricadas con los siguientes parámetros de impresión: diámetro de boquilla 0.4 mm; temperatura de la boquilla 200 °C; temperatura de la cama 75 °C; velocidad de impresión 30 mm/s; nivel de relleno 100%; altura de capa 0.3 mm; y orientación de los filamentos 45/-45. Todas las entallas fueron mecanizadas después de la impresión.

El número total de placas ensayadas fue 36, combinando dos tipos de entalla (en U y en V con $\alpha=60^\circ$), dos radios de entalla ($\rho = 0.9$ mm y 1.3 mm), dos anchos de probeta ($W = 60$ mm y 120 mm), dos espesores ($B = 5$ mm y 10 mm) y dos relaciones entre longitud de entalla y ancho de la probeta ($a/W = 0.25$ y 0.50). En la Figura 1 se muestra un esquema de las entallas (las medidas reales se muestran en la Tabla 2).

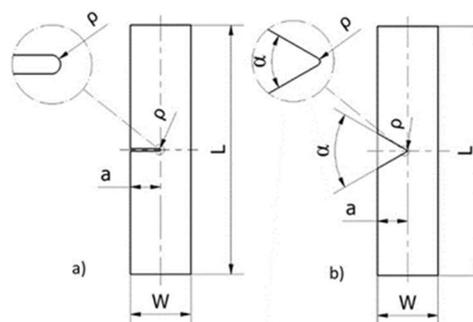


Figura 1. Esquema de probetas ensayadas. a) Probetas con entalla en U; b) Probetas con entalla en V.

Tabla 2. Programa experimental: parámetros geométricos, cargas críticas (P_{exp}), coordenadas K_r y L_r , y estimaciones de cargas críticas (P_{est}) a partir de la metodología FAD.

Entalla	Probeta	a (mm)	W (mm)	ρ (mm)	B (mm)	P_{exp} (kN)	K_r	L_r	P_{est} (kN)	P_{est}/P_{exp}	
Entalla U	201	30.60	60.51	0.86	4.85	3.87	1.49	1.29	2.30	0.59	
	202	30.84	60.38	0.91	4.88	3.86	1.51	1.31	2.25	0.58	
	203	30.73	60.50	0.83	4.85	3.89	1.52	1.31	2.25	0.58	
	204	30.66	60.46	0.87	10.02	8.52	1.60	1.37	4.60	0.54	
	205	30.59	60.46	0.88	9.96	8.54	1.60	1.38	4.60	0.54	
	206	30.83	60.49	0.86	9.98	8.76	1.67	1.43	4.60	0.52	
	207	31.02	120.36	0.81	4.96	10.55	1.07	0.66	9.00	0.85	
	208	30.34	120.31	0.83	4.98	13.15	1.29	0.80	9.20	0.70	
	209	30.58	120.20	0.89	4.97	10.14	1.00	0.63	9.20	0.91	
	210	31.02	120.36	0.89	10.14	24.43	1.20	0.74	19.00	0.78	
	211	30.92	120.43	0.84	10.13	26.41	1.30	0.80	19.00	0.72	
	212	31.06	120.48	0.88	10.00	23.07	1.15	0.71	18.50	0.80	
	Entalla V	301	30.85	60.48	1.24	4.86	3.69	1.39	1.23	2.30	0.62
		302	30.98	60.40	1.24	4.91	4.29	1.63	1.44	2.30	0.54
		303	30.91	60.54	1.26	4.77	3.80	1.47	1.30	2.30	0.60
		304	30.85	60.47	1.26	9.96	8.63	1.59	1.38	4.65	0.54
		305	31.19	60.55	1.27	9.92	8.60	1.62	1.41	4.60	0.53
		306	30.95	60.47	1.25	9.93	8.40	1.56	1.36	4.60	0.55
		307	30.62	120.32	1.26	4.88	11.51	1.12	0.71	9.60	0.83
		308	30.93	120.30	1.27	4.92	11.21	1.09	0.69	9.60	0.86
		309	30.92	120.42	1.26	4.94	11.46	1.11	0.70	9.60	0.84
		310	31.02	120.25	1.27	9.96	25.37	1.22	0.77	19.00	0.75
		311	31.04	120.33	1.26	9.93	22.38	1.08	0.69	19.00	0.85
		312	31.08	120.43	1.26	9.93	26.31	1.27	0.80	19.00	0.72
Entalla V	401	27.03	60.56	1.25	4.76	4.27	1.27	1.10	2.95	0.69	
	402	26.87	60.54	1.05	4.80	4.09	1.21	1.03	2.95	0.72	
	403	26.99	60.49	0.89	4.83	4.58	1.38	1.16	2.95	0.64	
	404	26.95	60.60	0.65	9.92	9.56	1.43	1.15	6.00	0.63	
	405	26.92	60.55	0.93	9.99	10.04	1.45	1.20	6.00	0.60	
	406	26.93	60.58	0.87	9.92	8.76	1.28	1.06	6.00	0.68	
	407	26.95	120.24	1.07	4.89	10.65	0.93	0.61	10.50	0.99	
	408	26.50	120.26	1.15	4.83	10.30	0.89	0.59	10.50	1.02	
	409	26.80	120.33	1.01	4.86	12.05	1.06	0.69	10.50	0.87	
	410	26.96	120.46	0.97	9.94	24.25	1.05	0.68	21.00	0.87	
	411	26.92	120.29	0.89	9.95	25.32	1.11	0.71	21.00	0.83	
	412	26.87	120.53	1.05	9.95	24.10	1.03	0.68	21.00	0.87	

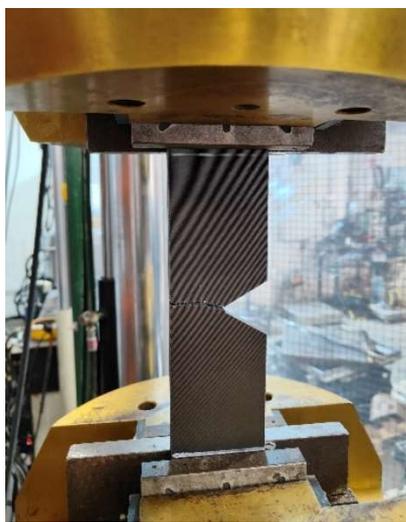


Figura 2: Configuración experimental.

La velocidad de carga de los ensayos fue 1 mm/min. Para cada ensayo se registró la curva carga-desplazamiento, determinando la carga crítica correspondiente (P_{exp}) (ver Tabla 2). La Figura 2 muestra un ejemplo de la configuración experimental.

2.2. Métodos

Este trabajo proporciona la evaluación FAD de placas con entallas de PLA-Gr impresas mediante FDM. Por lo tanto, existen dos cuestiones a considerar: 1) el uso de la metodología FAD para entallas, en lugar de fisuras, y; 2) el uso de la metodología FAD para analizar materiales no metálicos.

En los FADs, la condición límite la establece la línea de fallo, definida por la siguiente expresión:

$$K_r = f(L_r) \quad (3)$$

Las diferentes funciones $f(L_r)$ son correcciones plásticas en la evaluación a fractura elástico-lineal, cuya solución exacta es:

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

siendo J la integral-J aplicada y J_e la componente elástica de J . Los procedimientos de evaluación de integridad estructural ofrecen soluciones aproximadas de (4), que se definen a través de las propiedades de tracción del material.

Es posible aplicar el método FAD, definido para el análisis de defectos tipo fisura, a los defectos tipo entalla. Esto requiere que el problema entallado se trate como un problema fisurado equivalente [4], con las siguientes condiciones:

- El componente entallado puede analizarse como si estuviera fisurado, pero con una mayor resistencia a la fractura (tenacidad aparente, K_{mat}^N) que la que tendría en condiciones fisuradas (tenacidad a la fractura, K_{mat}). Por tanto, K_r tiene que modificarse para tener en cuenta el posible aumento en la resistencia a la fractura utilizando K_{mat}^N .
- El efecto entalla es muy limitado en la carga límite (P_L) y en la tensión de referencia (σ_{ref}) [11]. Por tanto, la definición de la coordenada L_r es la misma que en condiciones de grieta.
- La solución a la línea de fallo se puede aplicar en condiciones entalladas debido a que la dependencia de la solución de la ecuación (4) con el radio de entalla es muy débil [12].
- En relación con el uso de FAD para materiales no metálicos, en [13] se demostró cómo las aproximaciones a la ecuación (4) proporcionadas por los procedimientos de evaluación de integridad estructural, basados en las propiedades de tracción del material, resultaron conservadoras (es decir, seguras) para una amplia gama de materiales estructurales no metálicos, como polímeros, composites y rocas.

Por todo lo anterior, es únicamente necesario calcular la tenacidad aparente (K_{mat}^N) que, en este trabajo, se estimará mediante la TDC y, particularmente, mediante el Método de la Línea [2]. La TDC utiliza (junto a la tenacidad) el parámetro de la distancia crítica (L) para evaluar el proceso de fractura:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (5)$$

donde σ_0 es la tensión inherente del material. El Método de la Línea supone que la fractura se produce cuando la tensión promedio a lo largo de una distancia igual a $2L$ (medida desde el fondo de entalla), alcanza σ_0 :

$$\frac{1}{2L} \int_0^{2L} \sigma(r) dr = \sigma_0 \quad (6)$$

El Método de la Línea genera predicciones de la tenacidad aparente desarrollada por componentes que contienen entallas tipo U [2] (su uso en entallas en V con ángulo de apertura menor de 90° está justificada en [14]): combinando la ecuación (6) con la distribución de tensiones en el fondo de entalla estimada por Creager-Paris [15], se obtiene K_{mat}^N :

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

De esta manera, la única corrección necesaria por la presencia de entallas para utilizar el método FAD se realiza sobre el parámetro K_r , definido como:

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

Dado que consideramos que las entallas en el material real se comportan como fisuras en el material equivalente, los valores de K_I en este trabajo se determinan para la carga crítica correspondiente (P_{exp}) utilizando las soluciones analíticas proporcionadas para fisuras de borde en placas finitas [16]. El efecto entalla se considera a través de K_{mat}^N para el radio de entalla (ρ) propio y utilizando los valores de K_{mat} y L recopilados en la Tabla 1 [10].

Para calcular L_r , ecuación (2), no es necesaria aplicar ninguna corrección por entalla. Por lo tanto, se utilizarán las soluciones de P_L proporcionadas por [16] para fisuras de borde en placas finitas. El valor de P utilizado para definir L_r es P_{exp} (ver Tabla 2). Cabe señalar que puede haber placas entalladas en una situación intermedia entre condiciones de tensión plana y de deformación plana. En tales casos, los valores de P_L se obtuvieron a partir de la interpolación lineal entre las soluciones de tensión plana y deformación plana de P_L proporcionadas por [16], con los límites de interpolación para condiciones de deformación plana y de tensión plana, ecuaciones (9) y (10) [2], respectivamente:

$$B \geq 2.5 \left(\frac{K_{mat}^N}{\sigma_y} \right)^2 \quad (9)$$

$$B \leq \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}^N}{\sigma_y} \right)^2 \quad (10)$$

Para definir la línea de fallo, se utilizará la Opción 1 de la BS7910. Las ecuaciones de (11) a (16) definen esta línea, curva K_r - L_r , a partir de las propiedades a tracción del material (E , σ_y , σ_u , de la Tabla 1):

$$K_r = f(L_r) = \left[1 + \frac{1}{2}(L_r)^2\right]^{-0.5} \cdot [0.3 + 0.7 \cdot e^{-\mu \cdot (L_r)^6}]$$

para $L_r \leq 1$ (11)

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

para $1 < L_r \leq L_{r,max}$ (12)

$$K_r = f(L_r) = 0 \quad \text{para } L_r = L_{r,max}$$
 (13)

$$\mu = \min \left[0.001 \cdot \frac{E}{\sigma_y}; 0.6 \right]$$
 (14)

$$N = 0.3 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_y}{\sigma_u}\right)$$
 (15)

$$L_{r,max} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2 \cdot \sigma_y}$$
 (16)

Finalmente, se observa la condición de seguro o inseguro del punto de evaluación, con coordenadas (K_r, L_r) , respecto a la línea de fallo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 recoge las coordenadas (K_r, L_r) calculadas para las diferentes placas ensayadas, y las Figuras 3 y 4 muestran los FADs resultantes. La tabla también recoge las cargas críticas estimadas (P_{est}) , que se calculan de la siguiente manera (ver Figura 3a): la carga crítica se corresponde con aquella que genera un punto de evaluación exactamente sobre la línea de fallo (punto B). Por lo tanto, y siempre que la longitud del defecto (a) sea constante, el proceso de carga (para niveles crecientes de carga) es una línea recta, obteniéndose P_{est} directamente de la ecuación (17) (siendo C el punto de evaluación para P_{exp}):

$$P_{est} = P_{exp} \cdot \frac{\overline{OB}}{\overline{OC}}$$
 (17)

Finalmente, la Tabla 2 también muestra la relación P_{est}/P_{exp} .

En las Figuras 3 y 4 se puede observar que el 97% de los puntos (35 de 36) que representan la rotura están ubicados por encima de la línea de fallo, correctamente en la zona insegura del diagrama. Cuanto más alejados estén los puntos de la línea de fallo, más conservador será el análisis, cuantificado mediante la relación P_{est}/P_{exp} .

Por lo tanto, el enfoque propuesto proporciona estimaciones seguras de las cargas críticas para probetas con entallas en U y en V, con una cantidad razonable de conservadurismo. La principal fuente del conservadurismo puede deberse al bajo nivel de confinamiento de las placas, que se ensayan a tracción, mientras que la tenacidad a la fractura se obtiene a partir de probetas con alto confinamiento (SENB). Esta cuestión, ha sido tratada por los autores previamente [8].

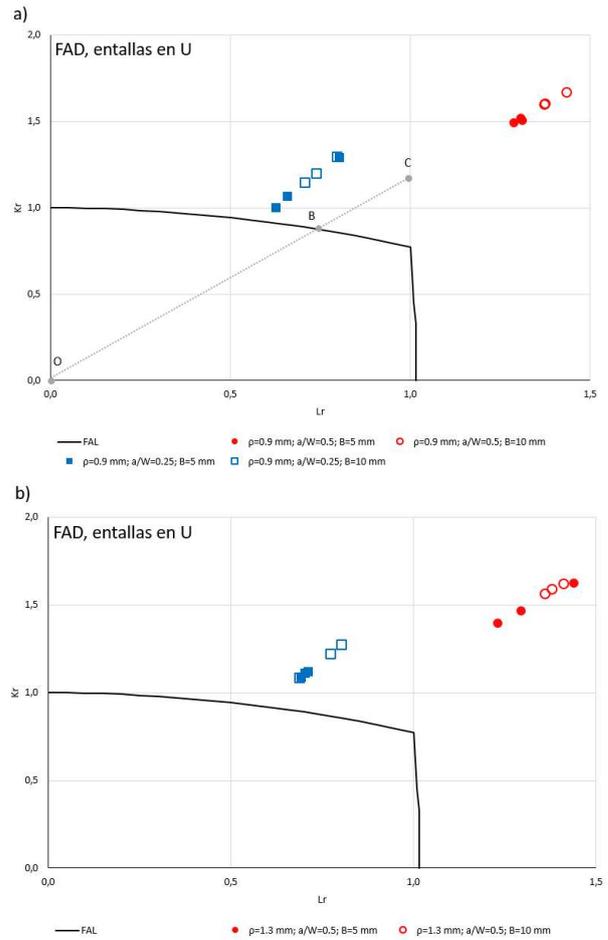


Figura 3: Evaluación FAD de probetas con entallas en U. a) Probetas de 201 a 215; b) Probetas de 301 a 312.

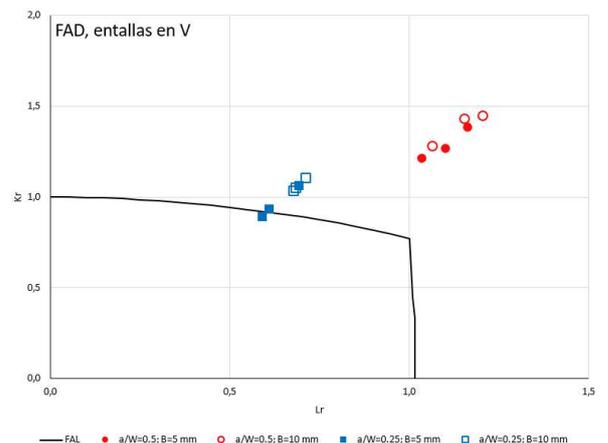


Figura 4: Evaluación FAD de probetas con entallas en V. Probetas de 401 a 412.

5. CONCLUSIONES

Este artículo evalúa el comportamiento a fractura de placas de PLA reforzado con grafeno, fabricadas por modelado por deposición fundida (FDM), que contienen diferentes tipos de entallas. La metodología de evaluación se basa en la aplicación combinada de los Diagramas de Fallo (FADs) y la corrección de entalla

derivada de la Teoría de Distancias Críticas (TDC), empleando el Método de la Línea.

El enfoque ha sido validado mediante su aplicación a un programa experimental compuesto por 36 placas que combinan diferentes tipos de entallas (U y V), espesores (5 mm y 10 mm), relaciones entre longitud de la entalla y ancho de la placa. (a/W) y radios de entalla (ρ).

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que el enfoque propuesto puede usarse para generar estimaciones conservadoras de cargas críticas en placas con entallas en U y en V. Este conservadurismo es, de todos modos, similar al descrito en la literatura, y aceptado en la práctica, para materiales metálicos sujetos a condiciones de bajo confinamiento.

AGRADECIMIENTOS

Esta publicación es parte del proyecto “Comportamiento en fractura y efecto entalla en compuestos de matriz termoplástica obtenidos por fabricación aditiva, PID2021-122324NBI00” financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER “Una manera de hacer Europa”.

REFERENCIAS

- [1] British Standard 7910, *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, London, UK (2019).
- [2] D. Taylor. *The Theory of Critical Distances*. Elsevier, Oxford, UK (2007).
- [3] 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*, Eng. Fail. Anal., 29 (2013) 108–121, doi: 10.1016/j.engfailanal.2012.11.010.
- [4] 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., 78, 16, (2011) 2809–2825, doi: 10.1016/j.engfracmech.2011.08.009.
- [5] J. T. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro, J. Anton, A. Young, A. Jerez, D. Steinbach, C. Kroese, P. G. Ifju. *Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts*, Rapid Prototyp. J., 23, 4, (2017) 811–824, doi: 10.1108/RPJ-03-2016-0042.
- [6] C. T. Ng, L. Susmel, *Notch static strength of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS)*, Addit. Manuf., 34, (2020) 101212, doi: 10.1016/j.addma.2020.101212.
- [7] S. Cicero, V. Martínez-Mata, A. Alonso-Estebanez, L. Castanon-Jano, B. Arroyo. *Analysis of Notch Effect in 3D-Printed ABS Fracture Specimens*

- Containing U-Notches, Materials (Basel), 13, 21, (2020) 4716, doi: 10.3390/ma13214716.
- [8] S. Cicero, M. Sánchez, V. Martínez-Mata, S. Arrieta, B. Arroyo. *Structural integrity assessment of additively manufactured ABS, PLA and graphene reinforced PLA notched specimens combining Failure Assessment Diagrams and the Theory of Critical Distances*, Theor. Appl. Fract. Mech., 121, (2022) 103535, doi: 10.1016/j.tafmec.2022.103535.
- [9] S. Cicero, S. Arrieta, M. Sánchez, L. Castanon-Jano. *Analysis of additively manufactured notched PLA plates using failure assessment diagrams*, Theor. Appl. Fract. Mech., 125, (2023) 103926, doi: 10.1016/j.tafmec.2023.103926.
- [10] S. Cicero, V. Martínez-Mata, L. Castanon-Jano, A. Alonso-Estebanez, B. Arroyo. *Analysis of notch effect in the fracture behaviour of additively manufactured PLA and graphene reinforced PLA*, Theor. Appl. Fract. Mech., 114, (2021), doi: 10.1016/j.tafmec.2021.103032.
- [11] A. G. Miller. *Review of limit loads of structures containing defects*, Int. J. Press. Vessel. Pip., 32, 1–4, (1988) 197–327, doi: 10.1016/0308-0161(88)90073-7.
- [12] A. J. Horn, A. H. Sherry. “An engineering assessment methodology for non-sharp defects in steel structures – Part I: Procedure development,” Int. J. Press. Vessel. Pip., 89, (2012) 137–150, doi: 10.1016/j.ijpvp.2011.10.014.
- [13] J. D. Fuentes, S. Cicero, F. T. Ibáñez-Gutiérrez, I. Procopio. *On the use of British standard 7910 option 1 failure assessment diagram to non-metallic materials*, Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 41, 1, (2018) 146–158, doi: 10.1111/ffe.12668.
- [14] P. Lazzarin, F. Berto. *Some Expressions for the Strain Energy in a Finite Volume Surrounding the Root of Blunt V-notches*, Int. J. Fract., 135, 1–4, (2005) 161–185, doi: 10.1007/s10704-005-3943-6.
- [15] M. Creager, P. C. Paris. *Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking*, Int. J. Fract. Mech., 3, 4, (1967) 247–252, doi: 10.1007/BF00182890.
- [16] T. L. Anderson. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th ed., CRC Press - Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida (2005).