

ENSAYOS MECÁNICOS EN MATERIALES COMPUESTOS CON CONCENTRACIÓN DE TENSIONES: REVISIÓN DE LA LITERATURA

Victor Huaman¹, Fernando de Azevedo² y Victor Gamarra³

^{1,2,3}Departamento de Mecánica (DME) – Universidad estatal de Sao Paulo (UNESP) – Facultad de Ingeniería de Guaratinguetá (FEG), Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 - Pedregulho, Guaratinguetá – São Paulo, Brasil

¹victor.huaman@unesp.br ²fernando.azevedo@unesp.br ³victor.rosado@unesp.br

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre la concentración de tensiones en materiales compuestos de las referencias bibliográficas de la fuente Scopus. La investigación es de naturaleza descriptiva porque revisamos y comparamos los casos estudiados. La principal aportación de este trabajo es obtener relación y discusiones entre los resultados de los autores aplicados en sus métodos experimentales. Existen discontinuidades geométricas en los cuerpos estructurales y las elevadas tensiones locales pueden determinar el fallo de un elemento resistente; por ello, hoy en día es objeto de estudio, el de minimizar las tensiones en los cuerpos sólidos. El objetivo de esta revisión es analizar los resultados vía ensayos mecánicos de tracción uniaxial obteniendo las tensiones máximas respecto a la deformación: local, desplazamiento y porcentual obtenidos de los artículos científicos publicados durante los últimos 6 años.

Palabras Clave: *Ensayos mecánicos, materiales compuestos; concentración de tensiones.*

1. INTRODUCCIÓN

La sociedad que avanza tecnológicamente está desafiando continuamente los límites de materiales convencionales; requiriendo mejor rendimiento estructural de los materiales ante la necesidad industrial. Los proyectos de la industria actual exigen a diseñar materiales que no son posibles con los métodos de aleación convencionales. Los materiales compuestos forman un sistema de material compuesto por una mezcla o combinación y son insolubles entre sí. Los materiales compuestos pertenecen a una clase de materiales diseñados específicamente para afrontar este desafío. Los materiales compuestos de matriz de resina reforzados con fibra de vidrio se introdujeron por primera vez a principios de la década de 1940. Desde entonces, el uso de los compuestos está creciendo constantemente en diversas industrias como la aeronáutica, naval, automotriz, artículos deportivos, etc. Algunas de las ventajas de los compuestos incluyen alta resistencia específica, alta rigidez específica, resistencia a la fatiga y al impacto, conductividad térmica, resistencia a la corrosión y buena estabilidad dimensional. Los materiales compuestos son generalmente diseñados para poseer ciertas propiedades específicas deseables en esa aplicación. Se puede obtener una combinación inusual de propiedades no fácilmente obtenibles con aleaciones como mayor tenacidad a la fractura, mayor resistencia a la oxidación y a la corrosión, propiedades direccionales, buena resistencia al calor, al frío y a la humedad, facilidad de fabricación y bajo costo; por supuesto, no todos juntos simultáneamente [8]. Los materiales compuestos modernos, dependiendo de los materiales de matriz utilizados, se clasifican según matriz y según la morfología y configuración del refuerzo (Figura 1).

Según, Callister y Rethwisch (2018), los materiales utilizados en aplicaciones de alta tecnología se denominan materiales avanzados. Por lo general, estos materiales avanzados son materiales tradicionales cuyas propiedades se han mejorado, así como materiales de alto rendimiento que se han desarrollado recientemente. Además, pueden pertenecer a todo tipo de materiales (por ejemplo, metales, cerámica, polímeros) y son generalmente de alto costo. Los materiales avanzados incluyen semiconductores, biomateriales y lo que podríamos llamar “materiales del futuro” (es decir, materiales inteligentes y materiales de nanoingeniería). Estos materiales se utilizan en circuitos integrados, almacenamiento magnético de información, en pantallas de cristal líquido (LCD) o pantalla de cristal y fibras ópticas [3]. Además, Pilkey et al (2020), mencionan que miles de materiales se utilizan en aplicaciones de ingeniería y pueden clasificarse en función de distintos criterios. Por ejemplo, las fuerzas de enlace atómico varían en los distintos materiales, por lo que los materiales se clasifican como metálicos, cerámicos o poliméricos en función de las propiedades de enlace; además, la combinación de distintos materiales forma un material compuesto. Adicionalmente señala que, en el diseño de ingeniería, el análisis de tensiones se utiliza para determinar la distribución de las tensiones e identificar características y lugares críticos con mayor posibilidad de falla. El objetivo del análisis de tensión

es garantizar que el diseño de una estructura pueda soportar cargas específicas con una vida útil determinada, utilizando la cantidad mínima de material o área superficial, con los criterios óptimos. El análisis de tensión se puede realizar a través de técnicas matemáticas clásicas, modelos matemáticos analíticos, simulación computacional, pruebas experimentales o una combinación de métodos [10].

Además, Taheri-Behrooz et al (2017) mencionan que los agujeros son características necesarias de muchos componentes estructurales. La concentración de tensiones provocadas por la discontinuidad geométrica del componente controla la resistencia y la vida a fatiga de la estructura. El factor de concentración de tensiones (SCF) alrededor de un agujero se define como la tensión tangencial máxima, dividida por la tensión aplicada. El concepto de SCF en materiales anisótropos fue desarrollado por primera vez por Lekhnitskii y Savin en la década de 1960. Utilizaron una variable compleja para analizar el campo de tensiones y dieron una solución analítica de forma cerrada para obtener el campo de tensiones en una placa anisótropa infinita que contiene un agujero [15].

Los ensayos mecánicos, son métodos de pruebas de carga a fin de evidenciar el comportamiento estructural del componente como indica la norma ASTM D5766/D5766M – 11, este método de prueba determina la resistencia a la tracción en agujero pasante de laminados compuestos de matriz de polímero multidireccional reforzados con fibras de alto módulo. Las formas del material compuesto se limitan a compuestos reforzados de fibra continua o fibra discontinua (cinta o tela, o ambos) en los que el laminado está equilibrado y simétrico con respecto a la dirección de la prueba [1].

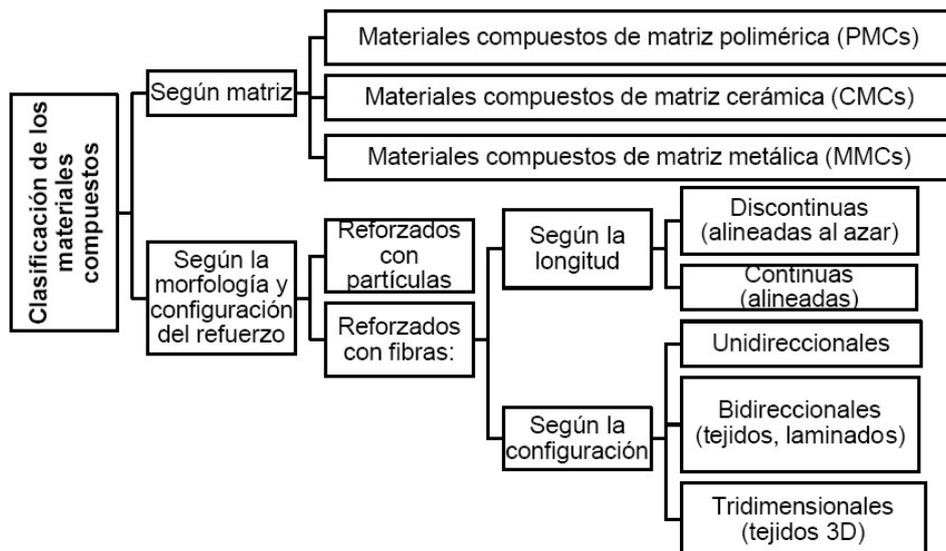


Figura 1: Clasificación de los materiales compuestos, según Springer (2013).

2. Metodología de los ensayos de los materiales compuestos

2.1. Materiales compuestos aplicados por ensayos mecánicos

De acuerdo con las bases bibliográficas, mostramos en la tabla 1; los materiales compuestos de impacto mundial, su obtención (fabricación), ensayo mecánico aplicado y la aplicación en la industria mundial.

Tabla 1. Descripción de materiales compuestos

Material Compuesto	Obtención	Aplicación
Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP) [5] [9].	Se fabrican mediante la adición de fibras de carbono a los polímeros a través de extrusoras y máquinas de moldeo por inyección. <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo mecánico por fatiga [5] - Ensayo mecánico por fatiga y tracción [9] 	Sistemas de fortalecimiento estructural confiables y de alto rendimiento en diversas áreas: <ul style="list-style-type: none"> - Ingeniería aeroespacial - Ingeniería automotriz - Ingeniería civil <p>Entre otras aplicaciones.</p>
Sistema de material de matriz de fibra de carbono/epóxi AS4/3501-6 [11].	Este material se fabrica mediante el apilado de varias capas de fibra de carbono impregnadas de resina en diferentes orientaciones y su posterior compactación y curado. <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo mecánico por fatiga [11] 	Este material se utiliza para aplicaciones, como: La industria aeroespacial, (componentes de cohetes y aeronaves). Biomédica, elementos estructurales con materiales fibra reforzados.
Polímero con Fibra de carbono (FC) [12] [13].	Se fabrica mediante diferentes métodos, como la laminación manual, la inyección de fibras o la inyección de resina. <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo mecánico por tracción [12] [13]. 	Se usa para aplicaciones que requieren alta resistencia, rigidez y ligereza, como: La industria aeroespacial, automotriz, naval y deportiva. También para estructuras de civiles.
Fibra de carbono T300 con resina epoxi 976 [4].	Impregnación de las fibras con la resina mediante un sistema de inyección o infusión, luego se coloca las fibras impregnadas en un molde o una forma según la orientación deseada y para el curado de la resina mediante la aplicación de calor y presión en una prensa.	<ul style="list-style-type: none"> - Campo aeroespacial. - Campo estructural.

	<p>Finalmente, para el recorte y acabado del producto final según las especificaciones.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo mecánico por tracción [4] 	
<p>Compuestos laminados de carbono/epoxi [15].</p>	<p>Usa el método de preimpregnación, que consiste en impregnar las fibras de carbono con la resina epóxica en estado líquido o semisólido, y luego curarla mediante calor y presión. El proceso se puede realizar de forma manual o automatizada, y se pueden emplear diferentes técnicas de curado, como el moldeo por autoclave, el moldeo por vacío o el moldeo por transferencia de resina.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Simulación numérica computacional [15] 	<p>Estos materiales se usan en la industria aeroespacial por su alta resistencia y rigidez específicas.</p>
<p>Material compuesto de organolamina de poliamida 6 [14].</p>	<p>La poliamida 6 es un polímero termoplástico que se forma por la polimerización de la caprolactama. La fibra de vidrio mejora las propiedades mecánicas y térmicas de la poliamida 6, como la rigidez, la resistencia, la dureza y la estabilidad dimensional. Una organolamina es una lámina delgada de material compuesto que se puede moldear por termoformado o inyección.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo mecánico por tracción [14] 	<p>Piezas estructurales para la industria automotriz, componentes para la industria eléctrica y electrónica y productos para la industria médica.</p>
<p>Laminado E-Vidrio (Glass) /epoxi unidireccional (UD) de 4 capas [7].</p>	<p>Las fibras de vidrio se obtienen a partir de minerales molidos (arena, caolín, calcita, colemanita, etc.) fundidos en hornos de fusión entre 1.400°C y 1.500°C para su posterior transformación en fibras. La composición de la masa de vidrio a fundir varía de acuerdo con los minerales que se utilicen, esto determina el tipo de fibra, así: Tipo E (E-glass, electrical glass), Tipo C (C-glass, chemical glass), Tipo ECR (ECR-glass), Tipo S y Tipo AR (AR-glass, Alkali-resistant glass).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo mecánico por tracción [7] 	<p>Se utiliza para reforzar estructuras que requieren alta resistencia y rigidez en una dirección. Se usan en el área aeroespacial, automotriz y marino.</p>

<p>Compuestos de matriz cerámica (CMC) basados en refuerzos de fibras de carbono y matrices de carburo de silicio [6].</p>	<p>Llamados compuestos C/SiC o C/C-SiC, se pueden fabricar mediante un proceso de tres pasos basado en el bobinado por filamento húmedo y el procesamiento LSI. (1) modelado de cuerpo verde CFRP por bobinado de filamento húmedo y curado sin presión en el mandril, (2) pirólisis a una preforma C/C porosa, y (3) densificación y acumulación de matriz de SiC por infiltración de fusión reactiva.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo mecánico por tracción [6] 	<p>Se usan para aplicaciones que requieren alta resistencia al impacto y a la temperatura.</p>
<p>Compuesto de carbono/epoxi reforzado con MWCNT [2].</p>	<p>MWCNT son las siglas de Multi-Walled Carbon Nanotubes o Nanotubos de Carbono de Pared Múltiple. Son una forma especial de nanotubos de carbono en la que varios nanotubos de una sola pared están anidados uno dentro de otro.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ensayo mecánico por tracción [2] 	<p>Ampliamente utilizados en aeroespacial, naval y automóvil industrias debido a sus excelentes propiedades en mayor rigidez, resistencia a la fractura y al impacto.</p>

2.2. Normativa y teoría sobre la concentración de tensiones en materiales compuestos.

Según la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM), en las probetas para ensayos mecánicos de resistencia por tracción en el agujero de materiales compuestos. Atribuyen parámetros geométricos estándar como muestra en la figura 2.

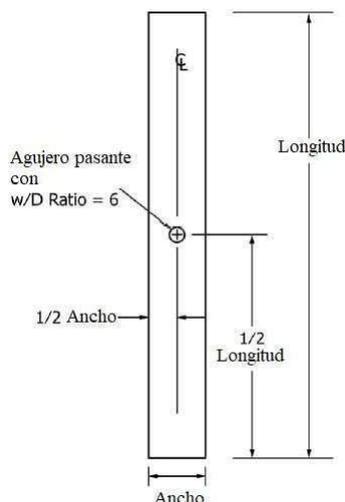


Figura 2: Figura de la probeta para ensayo de tracción del material compuesto, fuente ASTM D5766_D5766M-11(2018).

Para los parámetros de medidas de los cuerpos de pruebas están denominados en configuración A y configuración B [1], que se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de medidas de las probetas en materiales compuestos

Descripción	Abreviatura	Parámetros normados	
		Configuración (A)	Configuración (B)
Ancho	<i>W</i>	36 ± 1 mm [1.50 ± 0.05 in.]	36 ± 1 mm [1.50 ± 0.05 in.]
Largo	<i>L</i>	200 a 300 mm [8 a 12 in.]	150 a 200 mm [6 a 8 in.]
Espesor	<i>h</i>	El espesor nominal de 2,5 mm [0.10pulg.], con un intervalo admisible de 2 a 4 mm [0.080 a 0.160 in.].	
Diámetro	<i>D</i>	6 ± 0.06 mm [0.250 a 0.003 in.]	

2.2.1 Resistencia a la rotura.

Se calcula la resistencia a la rotura por tracción en el agujero de la probeta por resistencia a la tracción; utilizando la Ecuación 1.

$$F_x^{OHTu} = \frac{P^{max}}{A} \quad (1)$$

Donde:

F_x^{OHTu} = Resistencia última a la tracción en agujero pasante en la dirección de ensayo, en MPa [Psi],

P^{max} = Fuerza máxima soportada por la probeta antes de la falla, N [Lbf], y

A = Área bruta de la sección transversal (sin tener en cuenta el agujero) de Método de ensayo D3039/D3039M, mm^2 [$inch^2$].

2.2.2 Relación ancho y diámetro.

El cálculo de la relación ancho/diámetro real, como se muestra en la Ecuación 2. Indica la relación nominal calculada a partir de los valores de las medidas geométricas, el cual resultado debe de ser menor o igual a 6.

$$\frac{w}{D} (ratio) = \frac{w}{D} \quad (2)$$

Donde:

w = ancho de la probeta a través del agujero, mm [inch.], y

D = diámetro del agujero, mm [inch.].

2.2.3 Relación diámetro y espesor.

El cálculo de la relación diámetro/espesor, como se muestra en la Ecuación 3. Indica la relación nominal calculada a partir de los valores de las medidas geométricas, el cual resultado debe de ser menor a 1.

$$\frac{D}{h} (\text{ratio}) = \frac{D}{h} \quad (3)$$

Donde:

D = diámetro del agujero, mm [inch.].

h = espesor de la probeta, mm [inch.].

2.2.4 Factor de concentración de tensiones.

En la tensión máxima alrededor del agujero, el factor de concentración de tensiones para este caso es 3. También para el agujero en una placa que es un caso comúnmente a menudo otros factores de concentración de tensiones se validan "estándar" al valor de 3. La distribución de σ_{θ} en el borde del agujero se muestra en la figura 3.

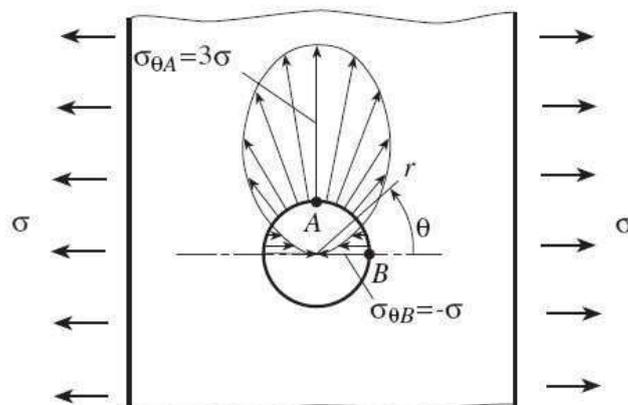


Figura 3: Distribución de tensión circunferencial en el borde de un agujero circular de una placa.

En el punto B, con $\theta = 0$, la Ecuación (4) es de:

$$\sigma_{\theta B} = -\sigma \frac{D}{h} \tag{4}$$

Donde:

$\sigma_{\theta B}$ = Tensión angular en el punto B, MPa [Lbf/inch²].

σ = Tensión nominal, MPa [Lbf/inch²].

3. RESULTADOS

Los resultados de los ensayos mecánicos por tracción uniaxial en las probetas del material 3D impreso de fibra de Carbono (de W/D = 3; D/h = 3,97) [12] y del CF/4% CNT/Epoxi (de W/D = 3; D/h = 3,97) [2], fueron de 10 KN y de 65 KN aproximadamente según en la curva fuerza y desplazamiento de la estructural global, de acuerdo con la figura 4.

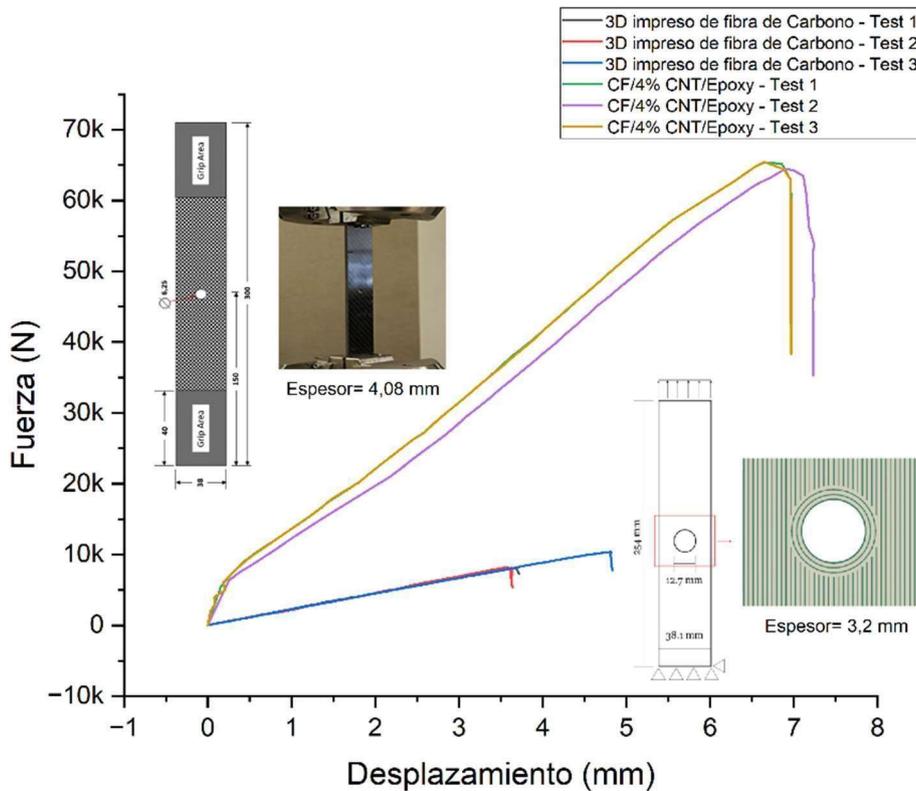


Figura 4: Curva de fuerza vs desplazamiento de dos materiales compuestos.

Los resultados de los ensayos mecánicos por tracción uniaxial en las probetas del material Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP) [9] y del Laminado E-Vidrio (Glass) /epoxi unidireccional (UD) de 4 capa [7], fueron de 300 MPa y de 450 MPa aproximadamente según en la curva tensión y deformación de la estructural global, de acuerdo con la figura 5.

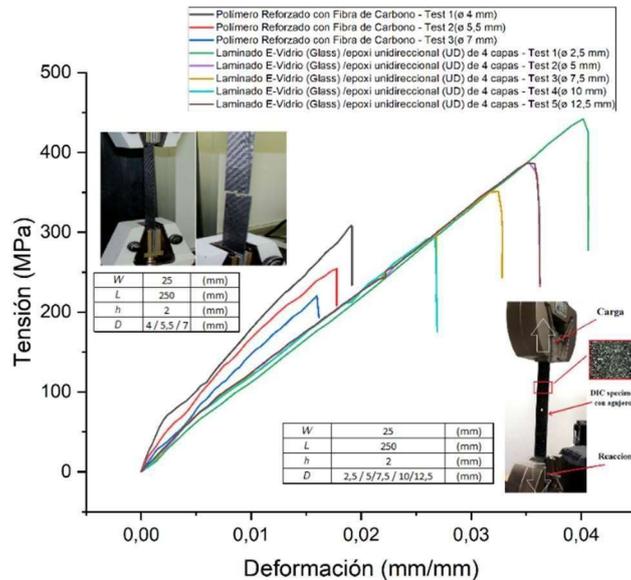


Figura 5: Curva de tensión vs deformación de dos materiales compuestos.

Los resultados de los ensayos mecánicos por tracción uniaxial en las probetas del material Compuesto de matriz cerámica (CMC) [6]; del Carbono T300 con resina epoxi 976 [4] y Material compuesto de organolámina de poliamida 6 [14], fueron de 180 MPa, 100 MPa y de 140 MPa aproximadamente según en la curva tensión y deformación (%) de la estructural global, de acuerdo con la figura 4.

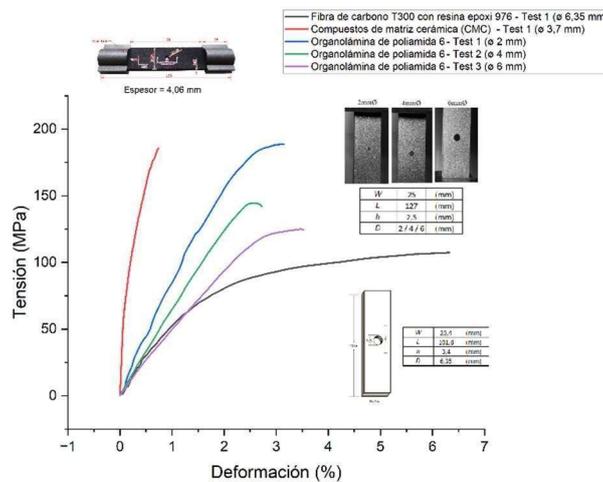


Figura 6: Curva de tensión vs deformación (%) de dos materiales compuestos.

4. CONCLUSIONES

Las probetas de materiales compuestos como CF/4% CNT/Epoxi a comparación al 3D impreso de fibra de Carbono, es de mayor resistencia mecánica y de menor concentración de tensiones. Luego el laminado E-Vidrio (Glass) /epoxi unidireccional (UD) de 4 a comparación al Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP), es de mayor resistencia mecánica y de menor concentración de tensiones. Finalmente, el compuesto de matriz cerámica (CMC) a comparación del Carbono T300 con resina epoxi 976 y el compuesto de organolámina de poliamida 6, es de mayor resistencia mecánica y de menor porcentaje de deformación. La concentración de tensiones aplicadas en los casos de estudio es un caso de discontinuidad geométrica que va a parecer en cualquier cuerpo solido sometido a esfuerzos. Después de la validar con los ensayos mecánicos, se genera el consumo del material y cumplir con los desafíos de la industria mundial.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Concejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico del Brasil (CNPq), a la Coordinación de A perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior del Brasil (CAPES), y al Departamento de Mecánica de la Universidad Estatal Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) del campus de Guaratinguetá (FEG) por el apoyo incondicional para la realización y financiación del trabajo.

6. REFERENCIAS

- [1] ASTM D5766_D5766M-11R18. Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates. ASTM International, 2018. https://doi.org/10.1520/D5766_D5766M-11R18. Consulta en 2022.
- [2] Bhowmik K., Mukhopadhyay T., Tarfaoui M., Khutia N., Roy Chowdhury A., & Lafdi K. Damage modeling of MWCNT reinforced Carbon/Epoxy composite using different failure criteria: a comparative study. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, Springer. Vol. 128, N° 7, Art. 549. 128(7), 2022. <https://doi.org/10.1007/s00339-022-05670-2>.
- [3] Callister William D., Rethwisch David G. *Ciência e Engenharia de Materiais, uma introdução*. 7ª Edición. Edit. Reverté, 2018.
- [4] Fedorenko A., Fedulov B., Safonov A., Lomakin E. Nonlinear shear behavior and failure of composite materials under plane stress conditions. *Acta Mechanical*, Vol. 228, N° 6, pp. 2033–2040. Springer, 2017 <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.185>. Consulta en 2022.
- [5] Feito N., Calvo J.V., Belda R., Giner E. An experimental and numerical investigation to characterize an aerospace composite material with open-hole using non-destructive techniques. *Sensors (MDPI)*, Vol. 20, N° 15, Art. 4148, pp. 1 - 18. 2020. <https://doi.org/10.3390/s20154148>. Consulta en 2022.



- [6] Gao X., Yu G., Xue J., Song Y. Failure analysis of C/SiC composites plate with a hole by the PFA and DIC method. *Ceramics International*, Vol. 43, N° 6, pp. 5255-5266. ScienceDirect, Elsevier, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.01.051>. Consulta en 2022.
- [7] Khechai A., Tati A., Guerira B., Guettala A., Mohite P.M. Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular, square and rectangular notches using digital image correlation. *Composite Structures*, Vol. 185, pp. 699-715. ScienceDirect, Elsevier, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.060>. Consulta en 2022.
- [8] Krishnaraj V., Zitoun R., Davim J.P. Drilling of Polymer-Matrix Composites. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38345-8_1. Consulta en 2022.
- [9] Mohamed Makki M., Chokri B. Experimental, analytical, and finite element study of stress concentration factors for composite materials. *Journal of Composite Materials*, Vol. 51, N° 11, pp. 1583-1594. SAGE Journals. 2017. <https://doi.org/10.1177/00219983166599>. Consulta en 2022.
- [10] Pilkey W.D., Pilkey D.F., Bi Z. *Peterson's Stress Concentration Factors*. 4th edition. John Wiley & Sons, 2020.
- [11] Russo A., Russo F., Palumbo C., Riccio A. Numerical Assessment on the Fatigue Behavior of Composite Open-Hole Tensile Specimens. *Macromolecular Symposia*, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma14123348>.
- [12] Sangaletti S., García I.G. Fracture tailoring in 3D printed continuous fibre composite materials using the Phase field approach for fracture. *Composite Structures*. Vol. 300, 116127. Science Direct, Elsevier, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116127>.
- [13] Sanei, S. H. R., Arndt, A., & Doles, R. Open hole tensile testing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, Vol. 54, N° 20, pp. 2687– 2695. 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998320902510>. Consulta en 2022.
- [14] Sattar S., Pedrazzoli D., Zhang M., Kravchenko S.G., Kravchenko O.G. Notched tensile strength of long discontinuous glass fiber reinforced nylon composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 163, 107217. ScienceDirect, Elsevier, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107217>.
- [15] Taheri-Behrooz F., Bakhshi N. Neuber's rule accounting for the material nonlinearity influence on the stress concentration of the laminated composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 36, N° 3, pp. 214–225, 2017. <https://doi.org/10.1177/0731684416680302>. Consulta en 2022.