

Caracterización mecánica de la tenacidad a la fractura en modo I de laminados impresos multidireccionales de fibra continua

Jonathan D. Santos¹,* Luis Córdova Narváez¹, José Quichimbo Quichimbo¹

¹ Grupo de investigación ATEI, Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, Ingeniería Civil.

Autor para correspondencia/ corresponding author, e-mail: jsantos@ups.edu.ec

Mechanical characterization of mode I fracture toughness in multidirectional printed continuous fiber laminates.

Resumen

El mecanismo de fallo por delaminación entre capas representa uno de los más críticos en materiales compuestos laminados (FRP), y ha motivado el desarrollo de numerosos estudios al respecto. Gran cantidad de literatura aborda esta fenomenología en compuestos unidireccionales. Sin embargo, bajo condiciones reales de servicio, un compuesto laminado puede iniciar y propagar fractura en interfaces con orientaciones de fibra distintas. El presente estudio aborda la caracterización experimental de la tenacidad a la fractura en modo I de un material compuesto de fibra continua, fabricado mediante manufactura aditiva (AM). Se definieron configuraciones con interfaces multidireccionales, basadas en predicciones obtenidas por simulaciones numéricas que implementan elementos cohesivos. Se detalla el proceso de diseño y fabricación de laminados de probetas de doble viga en voladizo (DCB), garantizando un crecimiento estable de grietas y confinado en un mismo plano. Los resultados experimentales demostraron comportamientos válidos para la caracterización de la energía de fractura en todas las configuraciones idóneas. La morfología de fractura de las muestras representativas de cada configuración fue analizada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), evidenciando ciertas similitudes entre las imágenes y mecanismos de fallos específicos entre las muestras.

Palabras clave: manufactura aditiva, tenacidad a fractura, laminados multidireccionales, delaminación.

Abstract

The delamination failure mechanism between layers is one of the most critical in laminated composite materials (FRP) and has driven the development of numerous studies on the subject. A significant portion of the literature addresses this phenomenon in unidirectional composites. However, under real service conditions, a laminated composite may initiate and propagate fracture at interfaces with different fiber orientations. This study focuses on the experimental characterization of mode I fracture toughness in a continuous fiber-reinforced composite material manufactured using additive manufacturing (AM). Configurations with multidirectional interfaces were defined based on predictions obtained from numerical simulations that



Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0



Editado por /
Edited by:
Eva O.L. Lantsoght

Recibido /
Received:
15/02/2025

Aceptado /
Accepted:
15/04/2025

Publicado en línea /
Published online:
04/10/2025



implement cohesive elements. The design and fabrication process of laminated double cantilever beam (DCB) specimens is detailed, ensuring stable crack growth confined to a single plane. The experimental results showed valid behaviors for fracture energy characterization across all suitable configurations. The fracture morphology of representative specimens from each configuration was analyzed using scanning electron microscopy (SEM), revealing certain similarities in the images and specific failure mechanisms among the samples.

Keywords: additive manufacturing, fracture toughness, multidirectional laminates, delamination.

INTRODUCCIÓN

Los compuestos laminados termoplásticos de fibra continua (cFRP) brindan una relación atractiva de rigidez-peso y resistencia-peso, lo cual ha permitido su extensivo uso en sectores como la aeronáutica y la aeroespacial [1, 2, 3, 4]. Sin embargo, las técnicas de manufactura convencional de componentes estructurales compuestos requieren de mano de obra calificada, maquinaria de altos costos y procesos productivos complejos [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. Estas exigencias limitan la factibilidad de producción de lotes reducidos, y dificultan aún más su aplicación en el proceso de prototipado versátil. La manufactura aditiva (AM) brinda una alternativa factible para superar estas limitaciones, ofreciendo la posibilidad de producir prototipos funcionales y componentes finales con geometrías complejas de manera eficiente [12, 13, 14, 15]. Actualmente, existen varias impresoras industriales y de sobremesa comerciales con la capacidad de crear cFRP mediante la tecnología de filamento compuesto preimpregnado, como las desarrolladas por Markforged® [16], 9T Labs® [17] y Anisoprint® [18]. En particular, el sistema Markforged® utiliza la tecnología de modelamiento por deposición fundida (FDM), integrando un cabezal de impresión con doble extrusor: uno para la deposición del filamento polimérico y el otro para el material compuesto, pudiendo ser este último la fibra continua de carbono, vidrio o aramida reforzando poliamida o nailon.

Los materiales compuestos fabricados con la tecnología Markforged® son considerados como estándares de referencia por la comunidad científica, por tanto, existen numerosos estudios sobre la caracterización experimental con énfasis en las propiedades mecánicas en el plano [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26]. Actualmente, existe una cantidad limitada de investigaciones enfocadas en la caracterización interlaminar. Iragi et al. [27] determinaron por primera vez la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I y modo II de cFRP de fibra de carbono reforzando una matriz polimérica de poliamida (CF/PA). Particularmente, la energía de fractura de modo I era superior que la de modo II, contrario a lo que usualmente se observa en compuestos convencionales. La energía de fractura en modo I es generalmente la más crítica y se utiliza como un valor conservador para fines de diseño [28], especialmente en FRP. Se asume que la tenacidad a la fractura aumenta de manera monótona desde el modo I (apertura de la grieta) hasta el modo II (deslizamiento por corte).

Contrario a la tendencia reportada por Iragi et al. [27] del material impreso CF/PA, Polyzos et al. [29] reportaron que la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I



($G_{Ic,ini} = 1.38 \text{ kJ/m}^2$) es inferior a la correspondiente en modo II ($G_{IIc,ini} = 2.02 \text{ kJ/m}^2$). En este estudio, a diferencia del trabajo de Iragi et al. [27], no se emplearon dobladores durante los ensayos experimentales. En línea con esta condición experimental, Fonseca et al. [30] determinaron la tenacidad a la fractura en modo I de especímenes de PoliAmida-12 (PA) y PA reforzada con un 15 % en peso de fibras cortas de carbono (SCF/PA) empleando AM. Los autores señalaron que el uso de dobladores podría incrementar la tenacidad global, dado que el daño puede iniciarse en la zona de contacto entre los brazos del espécimen y los dobladores, incrementando la energía disipada durante el ensayo. La tenacidad a la fractura de los especímenes reforzados (1780 J/m^2) fue más del doble en comparación con el material sin refuerzo (800 J/m^2).

Por su parte, Goh et al. [31] investigaron por primera vez los efectos de los parámetros de fabricación sobre la respuesta de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I del CF/PA, mediante una impresora de código abierto llamada *Hello BeePrusa*. Los resultados mostraron que un aumento en la temperatura de extrusión puede incrementar la energía de fractura hasta en un 200 %.

He et al. [26] estudiaron el comportamiento de la tenacidad a la fractura interlaminar en un compuesto CF/PA, comparando muestras DCB sometidas a un proceso de post-procesamiento por compresión en caliente con muestras impresas sin dicho tratamiento. Los resultados mostraron que la energía de fractura de iniciación en las muestras post-procesadas fue aproximadamente el doble que en las muestras obtenidas mediante proceso de impresión regular. Los resultados revelaron que las muestras obtenidas mediante impresión regular experimentaron una energía de fractura de propagación casi tres veces superior en comparación con las muestras tratadas. Este incremento de tenacidad de las muestras no tratadas fue atribuido a una mayor cantidad de formación de puentes de fibras experimentados durante el proceso de caracterización mecánica.

Se evidencia una limitada cantidad de estudios en relación con la caracterización a la tenacidad a la fractura en modo I de compuestos CF/PA, y ningún estudio sobre delaminación en laminados multidireccionales. Consecuentemente, el presente trabajo aborda el diseño numérico y posterior validación experimental de muestras DCB multidireccionales fabricadas por impresión aditiva. El estudio se enfoca en garantizar la presencia de modos de propagación de grieta adecuados, validar experimentalmente los resultados obtenidos, y contribuir al avance del estado del arte en la caracterización de este tipo de material explorando su capacidad como una alternativa factible para su posible aplicación en componentes estructurales en diversos sectores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de laminados multidireccionales

El presente estudio se llevó a cabo utilizando el conjunto de las propiedades mecánicas del material compuesto de fibra continua de carbono reforzando la matriz polimérica (CF/PA), detallado en la Tabla 1. El diseño de los laminados parte con el análisis del comportamiento elástico a flexión de las muestras DCB multidireccionales, conforme a los lineamientos de la normativa ISO-15024 [32]. Se establecen siete combinaciones



de orientaciones de las láminas en la interfase, siendo 0° , $\pm 15^\circ$, $\pm 30^\circ$ y $\pm 45^\circ$. Se evita la repetición de ángulos consistentemente con la naturaleza del estudio, con la finalidad de garantizar un proceso de apertura constante y simétrico durante el proceso de caracterización.

Se estableció una relación de rigidez a flexión entre los dos brazos de viga de las muestras igual o superior a 0.9. En consecuencia, todas las configuraciones de laminados que presenten una diferencia superior al 10 % en la rigidez a flexión entre ambos brazos de viga son descartadas del presente estudio. La configuración de los laminados inicia con la consideración de especímenes DCB delgados, conforme los resultados reportados por Santos et al. [33]. El espectro de muestras incorpora muestras con mayor rigidez a flexión, conforme lo reportado por Sebaey et al. [34]. El espectro de muestras generadas con este procedimiento se presenta en la Tabla 2.

La primera configuración del laminado, L1_12_12_01_02, donde L1 corresponde al nombre de la serie del laminado, los dos términos siguientes (12_12) indican la cantidad de capas en la viga inferior y superior, respectivamente, 01 y 02 indican la orientación de la capa de la interfase de la viga inferior y superior, respectivamente. La serie L1 establece una secuencia de apilado simétrica y balanceada en los dos brazos de viga. Donde el símbolo // indica la presencia de la interfase. Considerando las conclusiones de Sebaey et al. [34], el diseño de laminados incorpora muestras con espesores de 4 y 5 mm, ajustando la distribución de las capas en cada uno de los brazos, y respetando la relación de rigidez entre los brazos (0.9).

TABLA 1. Propiedades mecánicas del material compuesto CF/PA y su desviación estándar [33].
* Corresponde a los valores determinados por [27].

Propiedad	Valor y desviación estándar
Espesor de la capa (mm)	0.125
Resistencia transversal a compresión (MPa)	$66 \pm 6.6^*$
Resistencia longitudinal a tensión (MPa)	752 ± 88.6
Resistencia longitudinal a compresión (MPa)	$426 \pm 9.7^*$
Resistencia transversal a tensión (MPa)	49.3 ± 9.9
Resistencia a cortante (MPa)	31 ± 0.1
Tenacidad a la fractura en modo I (J/m^2)	1.7 ± 0.1
Tenacidad a la fractura en modo II (J/m^2)	2.3 ± 0.1
Módulo cortante en el plano (GPa)	2.1 ± 0.2
Coefficiente de Poisson	0.39 ± 0.03
Módulo elástico longitudinal (GPa)	66.5 ± 7.1
Módulo elástico transversal (GPa)	6.2 ± 1.1

TABLA 2. Configuraciones de la secuencia de apilado de las muestras obtenidas. “\$” indica la simetría impar y “//” significa el plano de delaminación.

Codificación	Configuración de apilado	Ángulos de la interfase
L1_12_12_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_4)_s // (\pm\theta_2/0_4)_s]$	0/15, -15/15, -30/30
L2_16_16_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_6)_s // (\pm\theta_2/0_6)_s]$	0/15, -15/15, -30/30, -45/45
L3_15_17_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_6)_s // (\pm\theta_2/0_7)_s]$	0/30, -15/30, 15/30
L4_15_18_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_6)_s // (\pm\theta_2/0_6)_s]$	0/45, -15/45, 15/45
L5_16_17_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_6)_s // (\pm\theta_2/0_7)_s]$	-30/45, 30/45
L6_20_20_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_8)_s]$	0/15, -15/15, -30/30, -45/45
L7_19_21_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	0/30, -15/30, 15/30
L8_19_22_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	0/45, -15/45, 15/45
L9_20_21_θ ₁ -θ ₂	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	-30/45, 30/45

La campaña de simulación numérica de las muestras indicadas en la Tabla 2, fue desarrollada mediante la versión estudiantil del software comercial de elementos finitos (FE) Abaqus/Standard 6.14. Los especímenes fueron modelados conforme una longitud de 100 mm y un ancho de 22.5 mm. Con la intención de optimizar el costo computacional de cálculo, la longitud de la muestra se dividió en tres regiones, siendo, pre-grieta (50 mm), zona de propagación de grieta (40 mm) y una zona de unión (10 mm). Con la finalidad de captar adecuadamente el espectro de esfuerzos y desplazamientos durante el ensayo, se refinó el mallado en los bordes y en la punta de grieta como se puede apreciar en la Figura 1. Los dos brazos de viga fueron modelados con el elemento C3D8I, la disposición de capas y su orientación consideran lo detallado en la Tabla 2.

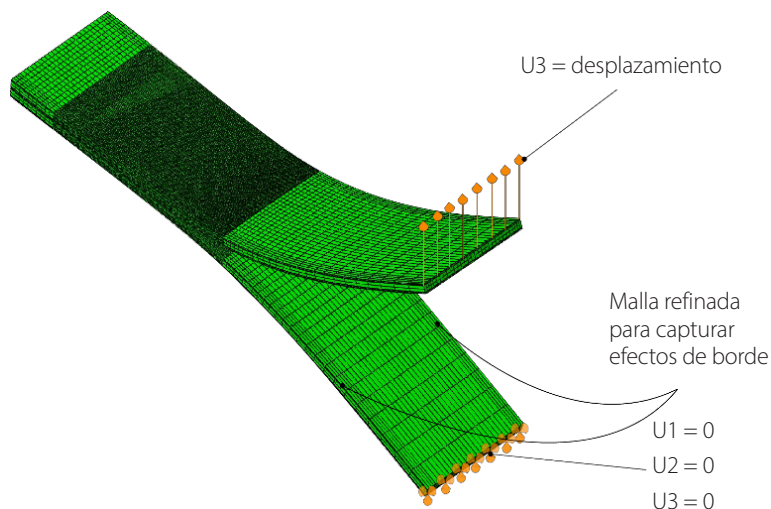


FIGURA 1. Modelo de simulación numérica para la campaña de MD-DCB.



La zona de propagación de grieta fue configurada mediante la implementación de elementos cohesivos de espesor despreciable, conforme a los lineamientos reportados por Turon et al. [35], esta configuración se desarrolló mediante la subrutina de elemento definido por el usuario, UEL. Adicionalmente, con la intención de observar modos de fallo de matriz en tensión, migración del plano de fractura interlaminar durante el ensayo, se implementó el criterio de fallo LaRC04 [36] mediante la variable de subrutina de usuario para generar la salida del elemento, UVARM.

El criterio de fallo LaRC04 [36] establece que, si durante el proceso de apertura el índice alcanza o supera a la unidad, la muestra experimenta el fallo, en este caso matriz a tensión. Consecuentemente, únicamente la serie de laminados L6 cumplió este lineamiento. Para asegurar la viabilidad de la posterior fase de validación experimental, se introdujo un factor de seguridad adicional de 2 a los laminados seleccionados. Por tanto, los especímenes multidireccionales de doble viga en voladizo (MD-DCB) de configuración L6 que cumplieron con esta evaluación son las interfases, 0/15, 15/-15 y 30/-30 y fueron considerados adecuados para su fabricación.

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAMINADOS ADECUADOS

La serie de laminados L6 y sus tres orientaciones, 0/15, 15/-15 y 30/-30, fue seleccionada para el desarrollo de la campaña experimental subsiguiente. Estos laminados fueron manufacturados mediante la impresora The MarkTwo® de Markforged, la cual, mediante su software de código cerrado, Eiger™, establece la deposición de capas superiores, inferiores y de contorno de PA.

Con el propósito de exponer la sección interna de fibras y garantizar la adecuada configuración del laminado, estas capas externas fueron retiradas mediante el uso de una sierra equipada con disco de diamante. Así, se obtuvieron muestras posprocesadas con una dimensión final de 175 mm de longitud, 25 mm de ancho y 5 mm de espesor. Además, se incorporó una pre-grieta de 50 mm, generada mediante la colocación de una cinta Kapton™ en la interfaz durante una pausa en el proceso de impresión.

Las pruebas de experimentación mecánica se realizaron en condiciones ambientales controladas, con una humedad relativa de $50 \pm 5\%$ y una temperatura de 23 ± 2 °C, conforme lo indica la normativa ISO-15024 [32]. Se empleó una máquina universal de ensayos MTS Insight, equipada con una celda de carga de 5 kN. La carga y descarga fueron configuradas como 1.5 y 25 mm/min, respectivamente. Estos valores de desplazamiento controlado fueron ajustados en pruebas preliminares.

Se ensayaron seis muestras por cada configuración de interfase (0/15, 15/-15 y 30/-30). La determinación de la energía de fractura fue calculada mediante el método de la J-integral [37], y, por tanto, cada muestra fue instrumentada con inclinómetros (ver Figura 2).

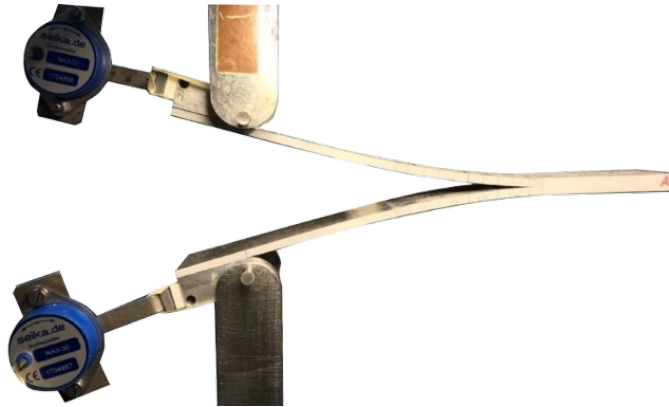


FIGURA 2. Muestra MD-DCB post-procesada e instrumentada durante ensayo.

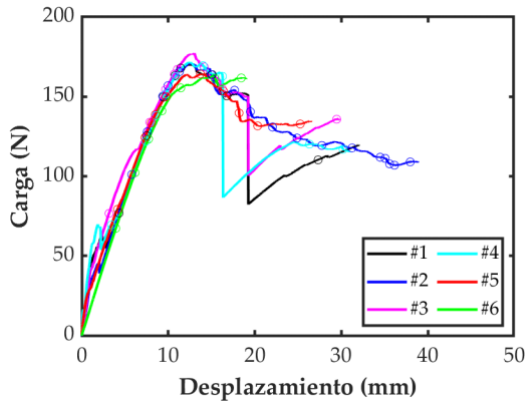
RESULTADOS

Las gráficas fuerzas vs desplazamiento de todas las orientaciones de la interfase, se ilustran en la Figura 3. En dichas curvas, las líneas continuas representan los datos registrados durante los ensayos, incluyendo las caídas de carga asociadas con el proceso de propagación de la grieta. Los símbolos circulares señalan las posiciones de longitud de grieta indicadas en la normativa ISO-15024 [32].

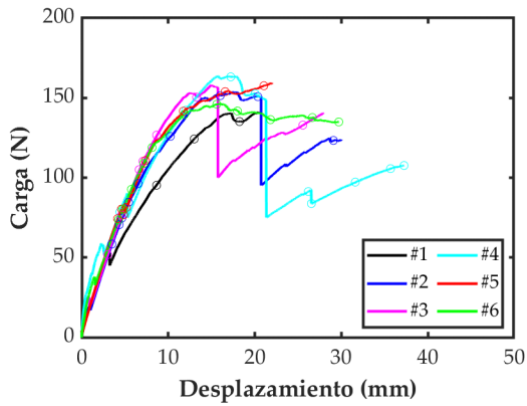
La configuración 0/15 experimentó el comportamiento más uniforme entre todos los lotes ensayados (Figura 3a), permitiendo que la totalidad de sus muestras fuesen consideradas en el proceso de reducción numérica de datos. Cabe destacar que, en las probetas #1 y #6, se identificaron caídas de carga a lo largo de la zona de propagación de fractura.

Por su parte, las curvas monotónicas reportadas por la configuración 15/-15 presentaron una mayor dispersión con relación a las muestras 0/15. En particular, la muestra #1 presentó una rigidez inferior con respecto a todo el resto del grupo (Figure 3b), motivo por el cual fue descartada del proceso de determinación de la tenacidad a la fractura de esta configuración. Asimismo, las muestras #2, #3, y #4 mostraron caídas de carga relevantes a lo largo de la zona de propagación de la grieta.

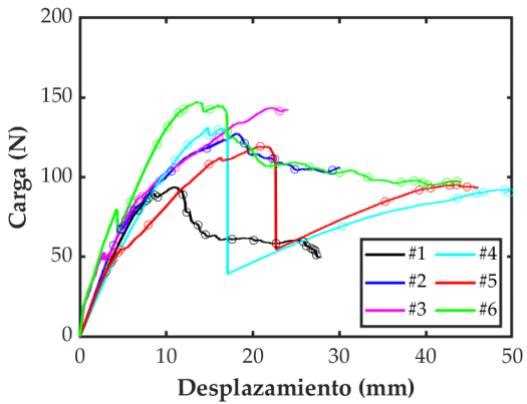
En las muestras con disposición 30/-30, se evidenció una relevante variabilidad entre las curvas fuerza vs desplazamiento (Figura 3c). En este caso, la muestra #6 alcanzó una fuerza máxima considerablemente mayor que todas las demás curvas, mientras que la muestra #5 presentó una rigidez reducida en el tramo no lineal de la curva. En contraste, la muestra #1 registró una fuerza máxima muy por debajo de todas las demás. Tras un análisis de la dispersión observada en los resultados, se determinó que las probetas #2 y #3 presentaron la mayor consistencia a lo largo de toda la curva. Por lo tanto, únicamente estos dos especímenes fueron seleccionados para la evaluación de la tenacidad a la fractura interlaminar de la configuración 30/-30.



Configuración 0/15



Configuración 15/15



Configuración 30/30

FIGURA 3. Curvas fuerza vs desplazamiento de las muestras MD-DCB. Elaboración propia.

Los valores de la tenacidad a la fractura obtenidos por cada configuración se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3. Tenacidad a la fractura en modo I de los especímenes MD-DCB caracterizados.

Configuración	Iniciación (J/m ²)	Propagación (J/m ²)
0/15	1760 ± 160	2150 ± 100
15/-15	870 ± 70	1700 ± 250
30/-30	960 ± 660	1760 ± 350

Como se muestra en la Tabla 3, la mayor tenacidad de iniciación y de propagación fue experimentada por la configuración 0/15, mientras que la tenacidad de iniciación más baja fue observada para la configuración 15/-15. Curiosamente, la tenacidad de propagación para las configuraciones 15/-15 y 30/-30 son virtualmente las mismas.

DISCUSIÓN

Las muestras representativas de cada orientación de interfases fueron sometidas a un análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), con la finalidad de observar las características morfológicas de la superficie de fractura. Para ello, la superficie fracturada fue cuidadosamente cortada mediante un disco de diamante, y la observación se desarrolló con una tensión de aceleración de electrones de 7 kV.

Las superficies de fractura presentadas en la Figura 4 comparten características comunes, entre las que se destacan zonas con presencia de matriz dominante, zonas dominadas por fibra y espacios visibles entre la fibra y la matriz. Adicionalmente, es posible observar que la superficie es notablemente áspera y rugosa, lo cual es coherente con la naturaleza del material y el proceso de fabricación utilizado. Estas observaciones son consistentes con las reportadas en Iragi et al., Polyzos et al. y Santos et al. [27, 29, 33].

Además de las características comunes observadas entre todas las muestras, la configuración 0/15 evidenció algunas fibras separadas de la matriz (Figura 4a). En la superficie se distinguieron los filamentos alineados con las direcciones 0 y 15°, los cuales fueron marcados con líneas discontinuas de color azul. Con un aumento mayor, Figura 4b, se aprecia el entrecruzamiento de las fibras, así como los signos de deformación plástica en la resina circundante.

Con respecto a la configuración 15/-15, se observó una menor cantidad de fibras fracturadas y vacíos en comparación con el laminado anterior (Figura 4c). La superficie de fractura, observada con un mayor nivel de ampliación en el SEM, revela claramente el entrecruzamiento de las capas (Figura 4d), así como la deformación plástica de resina adyacente, además de fibras fragmentadas y parcialmente extraídas de la matriz.

Por su parte, en la configuración 30/-30 se observa claramente el entrecruzamiento de fibras (Figura 4e). Con un mayor aumento de la imagen, se aprecia una región central

con varias fibras orientadas a 30°, las cuales han sido removidas de dicha superficie. También se identifican marcas de desprendimiento de fibras sobre la resina, así como fibras fracturadas visibles en un plano superior de la imagen.

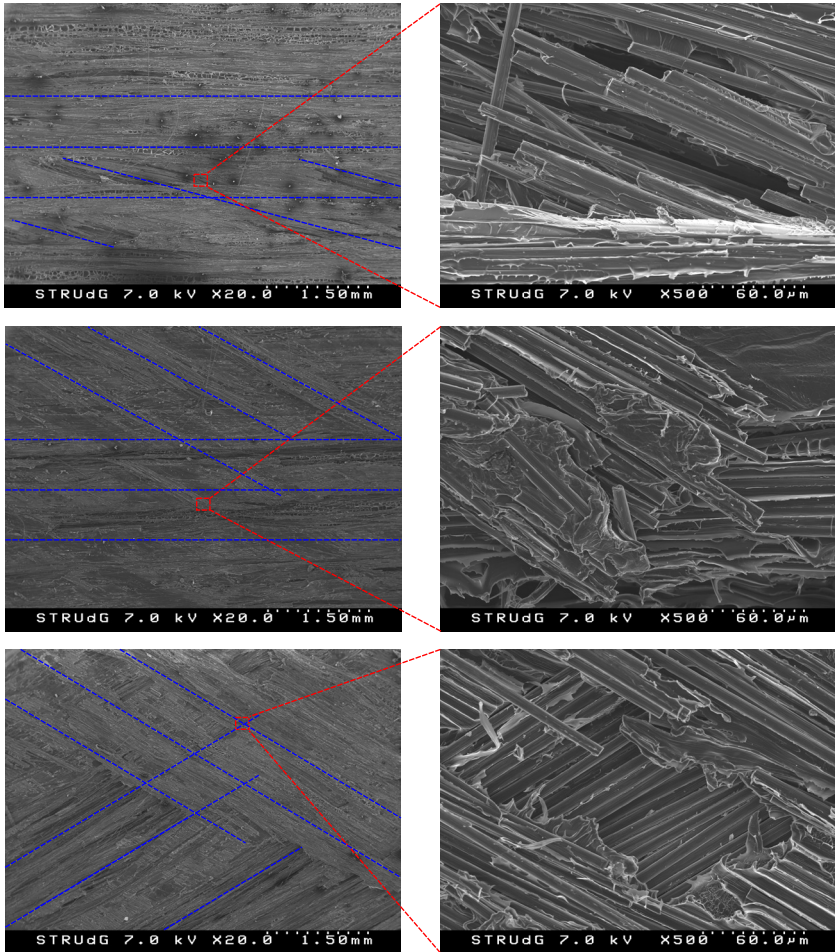


FIGURA 4. Imágenes SEM de las muestras representativas de cada configuración de laminado MD-DCB.
Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una campaña de simulación numérica para evaluar el comportamiento de diversas configuraciones de secuencia de apilado durante un ensayo de caracterización de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I del material compuesto CF/PA. Los especímenes MD-DCB más idóneos fueron posteriormente ensayados, con la finalidad de validar la metodología numérica empleada. Los resultados experimentales se presentan mediante curvas fuerza vs desplazamiento; además,



para profundizar en el entendimiento del comportamiento del material, se analizaron imágenes SEM de muestras representativas de cada configuración. A continuación, se exponen las conclusiones derivadas de este estudio.

- Las muestras experimentaron una propagación de fractura en modo I puro durante todo el ensayo. De los dieciocho especímenes caracterizados, todos mostraron una propagación de fractura válida, excepto uno, que mostró un salto de grieta al inicio del ensayo. Esta validación experimental exitosa propicia una futura exploración del comportamiento en modo II de este material compuesto.
- El incremento del ángulo entre las dos interfases de la probeta tiene un impacto directo tanto en la tenacidad a la fractura interlaminar del material como en la repetibilidad de los resultados obtenidos. Tal como se observa en el diagrama fuerza vs desplazamiento, las orientaciones 0/15 y 15/-15 presentan una alta repetitividad y tendencias de comportamiento claramente definidas, mientras que la configuración 30/-30 mostró la menor repetitividad.
- El análisis fractográfico de las muestras representativas reveló características comunes entre todas las muestras, coincidente con estudios previos reportados en la literatura. Asimismo, se identificaron particularidades específicas de cada una de las configuraciones, especialmente observadas con un mayor aumento de la amplificación de la imagen en la zona del entrecruzamiento de fibras.

Es importante destacar que este comportamiento de fractura del compuesto CF/PA, ante distintas orientaciones pero con una configuración de laminado constante, constituye una característica inherente del material. Por tanto, los potenciales diseñadores deben tenerlo en cuenta al evaluar su posible aplicación en contextos de prototipado o en componentes finales sometidos a determinadas sollicitaciones de carga.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Adquisición de financiamiento, administración del proyecto, conceptualización, investigación, desarrollo metodológico, validación, análisis formal, provisión de recursos, curación de datos, redacción del borrador original, y revisión y edición del manuscrito: Jonnathan D. Santos.

Validación, revisión y edición del manuscrito: Luis Córdova Narváez.

Validación, revisión y edición del manuscrito: José Quichimbo Quichimbo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaramos que no tenemos conflicto de interés sobre esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Prashanth, S., Subbaya, K., Nithin, K., & Sachidananda, S. (2017). Fiber reinforced composites - a review. *Journal of Material Science & Engineering*, 6(03). <https://pdfs.semanticscholar.org/9d4a/93d3a6a3352f0e56738991609486856bd64e.pdf>
- [2] Chung D. (2010). *Composite materials: science and applications*. Springer Science & Business Media.
- [3] Mallick, P. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing and design*. CRC press.
- [4] Gribniak, V. (2020). Special issue "Advanced composites: from materials characterization to structural application." *Materials*, 13(24). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma13245820>
- [5] Luo, G., Liou, G., & Xiao, H. (2022). Using a fiber bragg grating sensor to measure residual strain in the vacuum-assisted resin transfer molding process. *Polymers*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/polym14071446>
- [6] Liu, Z., Wang, H., Yang, L., & Du, J. (2022). Research on mechanical properties and durability of flax/glass fiber bio-hybrid FRP composites laminates. *Composite Structures*, 290. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115566>
- [7] Link, T., Rosenberg, P., & Henning, F. (2022). Prediction of gaps in automated tape laying and their influence on porosity in consolidated laminates. *Journal of Composites Science*, 6(7). <https://doi.org/10.3390/jcs6070207>
- [8] Nazariipoor, H., Ashrafizadeh, H., Schultz, R., Runka, J., & Mertiny, P. (2022). Acoustic emission damage detection during three-point bend testing of short glass fiber reinforced composite panels: Integrity assessment. *Journal of Composites Science*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/jcs6020048>
- [9] Xiao, H., Han, W., Tang, W., & Duan, Y. (2020). An efficient and adaptable path planning algorithm for automated fiber placement based on meshing and multi guidelines. *Materials*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/MA13184209>
- [10] Maldonado-Hurtado, D., Madrigal, J., Penades, A., Ruiz, R., Crespo, A., & Sales, S. (2021). Pultruded FRP beams with embedded fibre bragg grating optical sensors for strain measurement and failure detection. *Sensors*, 21(21). <https://doi.org/10.3390/s21217019>
- [11] Fidan, I., Imeri, A., Gupta, A., Hasanov, S., Nasirov, A., Elliott, A., Alifui-Segbaya, F., & Nanami, N. (2019). The trends and challenges of fiber reinforced additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5), 1801–1818. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03269-7>
- [12] Penumakala, P. K., Santo, J., & Thomas, A. (2020). A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108336>
- [13] Bettini, P., Alitta, G., Sala, G., & Di Landro, L. (2017). Fused deposition technique for continuous fiber reinforced thermoplastic. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(2), 843–848. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2459-8>
- [14] Kabir, S. F., Mathur, K., & Seyam, A. F. M. (2020). A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. *Composite Structures*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>
- [15] Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. *Composite Structures*, 182, 36–53. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>
- [16] *Markforged*. (2019). *3D Printing Materials*. <https://markforged.com/composites/>
- [17] 9T Labs. (6 de marzo de 2024). *Carbon composite material*. <https://www.9tllabs.com/technology/material>
- [18] *Anisoprint Sarl*. (2018). <http://anisoprint.ru/>
- [19] Bendine, K., Gihardt, D., Fiedler, B., & Backs, A. (2022). Experimental characterization and mechanical behavior of 3D printed CFRP. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2022.104587>
- [20] Li, L., Liu, W., & Sun, L. (2022). Mechanical characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Composites Science and Technology*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.compsitech.2022.109618>
- [21] Kikuchi, B. C., Bussamra, F. L. de S., Donadon, M. V., Ferreira, R. T. L., & Sales, R. de C. M. (2020). Moisture effect on the mechanical properties of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced nylon-based thermoplastic. *Polymer Composites*, 41(12), 5227–5245. <https://doi.org/10.1002/pc.25789>



- [22] Todoroki, A., Oasada, T., Mizutani, Y., Suzuki, Y., Ueda, M., Matsuzaki, R., & Hirano, Y. (2020). Tensile property evaluations of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites. *Advanced Composite Materials*, 29(2), 147–162. <https://doi.org/10.1080/09243046.2019.1650323>
- [23] Yogeshvaran, R. N., Liu, B. G., Farukh, F., & Kandan, K. (2020). Out-of-plane compressive response of additively manufactured cross-ply composites. *Journal of Mechanics*, 36(2), 197–211. <https://doi.org/10.1017/jmech.2019.59>
- [24] Parmiggiani, A., Prato, M., & Pizzorni, M. (2021). Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(7). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06997-5>
- [25] Saeed, K., McIlhagger, A., Harkin-Jones, E., McGarrigle, C., Dixon, D., Ali Shar, M., McMillan, A., & Archer, E. (2022). Characterization of continuous carbon fibre reinforced 3D printed polymer composites with varying fibre volume fractions. *Composite Structures*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115033>
- [26] He, Q., Wang, H., Fu, K., & Ye, L. (2020). 3D printed continuous CF/PA6 composites: Effect of microscopic voids on mechanical performance. *Composites science and technology*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108077>
- [27] Iragi, M., Pascual-González, C., Esnaola, A., Lopes, C. S., & Aretxabaleta, L. (2019). Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates; effects of processing conditions and microstructure. *Additive Manufacturing*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100884>
- [28] Conroy, M., Kinloch, A. J., Williams, J. G., & Ivankovic, A. (2015). Mixed mode partitioning of beam-like geometries: A damage dependent solution. *Engineering Fracture Mechanics*, 149(1), 351–367. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.06.061>
- [29] Polyzos, E., Katalagarianakis, A., Van Hemelrijck, D., & Pyl, L. (2021). Delamination analysis of 3D-printed nylon reinforced with continuous carbon fibers. *Additive Manufacturing*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102144>
- [30] Fonseca, J., Ferreira, I. A., Moura, M. F. S. F. De, Machado, M., & Alves, J. L. (2019). Study of the interlaminar fracture under mode I loading on FFF printed parts. *Composite Structures*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.005>
- [31] Goh, G., Yap, Y. L., Agarwala, S., & Yeong, W. Y. (2019). Recent progress in additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. *Advanced Materials Technologies*, 4(1). <https://doi.org/10.1002/admt.201800271>
- [32] International Organization for Standardization. (2001). *ISO 15024: Fibre-reinforced plastic composites — Determination of mode I interlaminar fracture toughness, GIc, for unidirectionally reinforced materials*.
- [33] Santos, J. D., Fernández, A., Ripoll, L., & Blanco, N. (2022). Experimental Characterization and Analysis of the In-Plane Elastic Properties and Interlaminar Fracture Toughness of a 3D-Printed Continuous Carbon Fiber-Reinforced Composite. *Polymers*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030506>
- [34] Sebaey, T. A., Blanco, N., Lopes, C. S., & Costa, J. (2011). Numerical investigation to prevent crack jumping in Double Cantilever Beam tests of multidirectional composite laminates. *Composites Science and Technology*, 71(13), 1587–1592. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.07.002>
- [35] Soto, A., González, E. V., Maimí, P., Turon, A., Aja, J. R. S. De, & Escalera, F. M. De. (2016). Cohesive zone length of orthotropic materials undergoing delamination. *Engineering Fracture Mechanics*, 159, 174–188. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.03.033>
- [36] Pinho, S. T., Dávila, C. G., Camanho, P. P., Iannucci, L., & Robinson, P. (2005). *Failure models and criteria for FRP under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity* (NASA/TM-2005-213530). NASA.
- [37] Sarrado, C. (2015). *Experimental characterization and numerical simulation of composite adhesive joints using the cohesive zone model approach* [Tesis de doctorado, Universitat de Girona]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/10803/384001>