

Daño en partes de manufactura aditiva reforzadas por fibras continuas

Damage of continuous fiber reinforced additive manufacturing components

Juan León B.^{1a}, Jorge Guillermo Díaz-Rodríguez^{1b}, Octavio Andrés González-Estrada^{1c}

¹Grupo de investigación en energía y medio ambiente (Giema), Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Orcid: ^a 0000-0002-1740-3127, ^b 0000-0002-0479-4827, ^c 0000-0002-2778-3389. Correos electrónicos: ^a juan.leon2@correo.uis.edu.co, ^b jorge.diaz5@correo.uis.edu.co, ^c agonzale@uis.edu.co

Recibido: 10 diciembre, 2019. Aceptado: 26 febrero, 2020. Versión final: 1 abril, 2020.

Resumen

La fabricación aditiva (AM), y más específicamente la impresión 3D, ha comenzado una revolución de la industria de la manufactura al proporcionar capacidades de producción para piezas que eran imposibles de fabricar hace algunos años. Una tecnología bastante reciente, desarrollada por Markforged, ha elevado estas capacidades a un nuevo nivel al permitir la impresión de compuestos de matriz polimérica con refuerzo continuo de fibra. Sin embargo, por ser este un método nuevo de fabricación, no existe un modelo consolidado para predecir las características mecánicas ni los modos de falla que presentan al estar sometidas a cargas. El presente trabajo recoge los estudios sobre el daño y falla progresiva en materiales compuestos de fibras largas producidos por manufactura aditiva.

Palabras clave: materiales compuestos; manufactura aditiva; modelado por deposición fundida; caracterización mecánica; falla progresiva.

Abstract

Additive manufacturing (AM), and more specifically 3D printing, has started a revolution in the manufacturing industry by providing production capabilities for parts that were impossible to produce a few years ago. A recent technology, developed by Markforged, has raised these capabilities to a new level by allowing the printing of polymer matrix composites with continuous fiber reinforcement. However, as this is a new manufacturing method, there is no consolidated model to predict the mechanical characteristics or failure modes they present when subjected to loads. The present work gathers the studies on the damage and progressive failure in composite materials with long fibers produced by additive manufacturing.

Keywords: composite materials; additive manufacturing; fused deposition modeling; mechanical characterization; progressive failure.

1. Introducción

Los materiales compuestos están hechos de al menos dos materiales diferentes: uno se llama fase de refuerzo y el otro es la fase de unión. Estos materiales son

ampliamente utilizados en diversos sectores industriales y, particularmente, aquellos producidos por fabricación aditiva (AM, por sus siglas en inglés) han encontrado usos en los sectores aeroespacial [1]–[3], automotriz [4], biomédico [5], deportivo e industrial. Se calcula que el

crecimiento de los materiales compuestos será alrededor del 7.8% en los próximos años [6], y llegará a 130 mil millones de dólares para el año 2024. Sin embargo, debido a la naturaleza multi-material de los compuestos, la falla puede tener mecanismos complejos [7] como la delaminación, el agrietamiento de la matriz, la ruptura de la fibra, el pandeo de la fibra, el aplastamiento de la matriz, entre otros, requiriendo un estudio más complejo del diseño.

La AM es una tecnología reciente, inventada en 1984 por Hull [8] con la estereolitografía y seguida por el FDM (modelado por deposición fundida, por sus siglas en inglés) con Crump [9]. Luego del vencimiento de la patente en 2010, movimientos como el replicado y otros florecieron, permitiendo la difusión de la innovación. La fabricación o manufactura aditiva es una técnica en la cual una parte se crea mediante la construcción de un volumen capa por capa [10] a partir de un archivo CAD, y tiene la ventaja de producir piezas de alta complejidad, buena dimensionalidad y con una amplia gama de materiales. Algunos inconvenientes son los bajos volúmenes de producción, reducidas dimensiones, el costo y la baja velocidad de fabricación.

Los materiales compuestos de AM reforzados por fibras (FRAM) [11] se pueden clasificar en dos: de fibras continuas y de fibras cortas. Los materiales de fibras continuas fueron introducidos por la empresa Markforged [12] para compuestos de matriz polimérica, y ya existen algunos desarrollos independientes [3]. Sin embargo, los materiales compuestos fabricados por AM no se limitan a compuestos de matriz polimérica. Existen otros materiales que emplean matrices de otro tipo como, p. ej., materiales compuestos funcionalmente graduados (FGCM) [13], materiales cerámicos de matriz metálica [14], [15], etc., utilizados en la industria aeroespacial, equipos biomédicos e industriales.

En los últimos años, la AM se ha utilizado para producir materiales compuestos de diferentes clases [16]–[18]. Se están investigando materiales compuestos funcionalmente graduados producidos por sinterización selectiva con láser de un metal y una cerámica para su uso en el sector aeroespacial [13]. Se han desarrollado polímeros FDM reforzados que han mejorado significativamente la resistencia y la rigidez de las antiguas piezas de polímero FDM [19], el uso de fibra de carbono picada ha mostrado propiedades mecánicas mejoradas con estos métodos, que incluso superan la resistencia del aluminio.

Sin embargo, el uso de la AM implica algunas complejidades únicas en la determinación de la resistencia y el análisis de fallas. Debido a la falta de una

etapa de compresión entre capas [5], pueden existir vacíos y porosidades entre capas fundidas [20], lo que aumenta la porosidad de las partes y disminuye su rendimiento mecánico. La falla de un material es un tema importante para ingenieros y científicos, porque queremos evitarla, o cuando sucede, determinar sus causas, evolución y repararla o evitar futuros daños. Por lo tanto, este artículo aborda la necesidad de revisar el estado del arte en la investigación de daños y fallas en piezas de fabricación aditiva reforzadas con fibra.

En la sección 2 se describe el proceso y los materiales empleados, mostrando las más recientes investigaciones en el desarrollo de materiales y técnicas para la AM de compuestos reforzados con fibras, haciendo énfasis en la anisotropía generada en el proceso. En la sección 3 se describen los efectos que tienen diferentes parámetros de proceso en la rigidez, resistencia y falla en las partes de manufactura aditiva. La sección 4 aborda el tema de la caracterización mecánica y las diferentes tipologías de fallas presentadas por los diversos ensayos. La sección 5 presenta los diversos métodos, tanto numéricos como analíticos, para el análisis de las propiedades mecánicas y la predicción de la falla progresiva de las partes en estudio. Finalmente, en la sección 6, se evidencian los retos en el área de investigación y la sección 7 extrae las conclusiones más notables de este trabajo. La recolección de información se realizó de forma sistemática mediante el empleo de la herramienta bibliométrica VosViewer para el análisis de las relaciones y las bases de datos Scopus y Web of Science.

2. Descripción del proceso y materiales

Actualmente, la AM de compuestos reforzados con fibras es realizada mediante procesos como estereolitografía (SL), manufactura de objetos laminados (LOM), FDM, sinterizado selectivo por laser (SLS) [21], extrusión [22] y CLFL (*continuous fiber lattice fabrication*) [23].

El FDM es un proceso de manufactura aditiva donde un filamento es alimentado hacia un extrusor, calentado por encima del punto de fusión y depositado en una plataforma donde se solidifica y se consolida la parte. El movimiento del extrusor está controlado por un software CNC de mínimo 3 ejes, ver Figura 1 (a). Se han generado desarrollos de impresoras de más de 3 ejes, donde es posible generar impresiones de refuerzos de fibras curvas [24].

En cuanto a las tecnologías FDM de polímeros reforzados con fibras, se pueden encontrar impresoras con uno o dos extrusores [25]. En la tipología de un solo extrusor, la fibra hace contacto con la matriz previamente a ser extruida, según lo muestra la Figura 1 (b). El uso de

un doble extrusor permite el uso de un filamento reforzado junto con un sistema de corte [26], el cual permite realizar un corte basado en el cálculo de la longitud de fibra a depositar para refuerzos continuos, Figura 1 (c). El refuerzo puede estar también en forma de fibras cortas, pudiéndose usar tanto uno, Figura 1 (a), como dos extrusores para su producción.

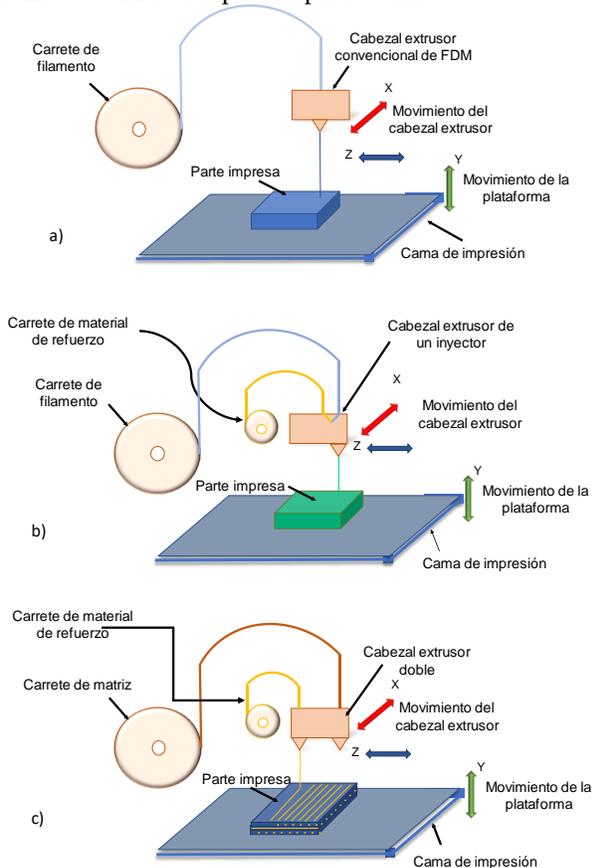


Figura 1. Proceso FDM para materiales compuestos: (a) sin refuerzo, (b) con refuerzo y un solo extrusor, (c) con refuerzo y doble extrusor. Fuente: elaboración propia.

Los materiales poliméricos empleados para la matriz son de tipo termoplástico como Nylon, ABS, PLA o PEEK. Estos en general presentan características mecánicas inferiores a las matrices poliméricas termoestables empleadas en los procesos de manufactura tradicionales como la resina epóxica o poliéster, sin embargo, estas no se pueden fundir lo que impiden el uso en el FDM. Warnung *et al.* [27] evaluaron las propiedades mecánicas y de manufacturabilidad de ocho matrices termoplásticas, y la lista sigue creciendo en la actualidad.

La fase de refuerzo, que puede venir en filamentos cortos o largos, suelen ser de carbono para filamentos cortos como, p. ej., el material Onyx [28], y para fibras largas se

utiliza de fibra de vidrio, carbono, Kevlar, o fibras con gran resistencia al impacto, como las de aramida [29]. Algunos autores han logrado desarrollar nuevos filamentos para impresión 3D, donde se destaca el empleo de fibras cortas de nanotubos de carbono [30], [31], que dotan de características mecánicas excelentes a las partes, pero a un elevado costo. Asimismo, se ha empleado fibra de vidrio y de carbono en arquitecturas especiales, como tejidas [16] y preimpregnadas [32]. Se están produciendo filamentos con fibras de refuerzo orgánicas continuas, que presentan la ventaja de ser biodegradables, además de tener un costo reducido [33]. Algunas investigaciones han producido refuerzos con cables metálicos que podrían facilitar la construcción de sensores térmicos o mecánicos [34].

Dickson *et al.* [35] estudiaron la mejora en la capacidad de carga de materiales tejidos usando AM. Para ello utilizaron una impresora modificada que permite el diseño de bordes limpios en uniones ribeteadas o aperturas, mostrando la mejora en la resistencia y la disminución de algunos modos de falla como la delaminación. Por otra parte, se han producido por AM partes de material compuesto híbrido [36], es decir, que usan dos tipos de refuerzo como, p. ej., fibra de carbono y fibra de vidrio, aunque las dos fibras no son embebidas al tiempo.

Cada uno de los materiales utilizados en FDM se adapta mejor a un tipo de proceso dado, existiendo ciertas restricciones de compatibilidad. Por ejemplo, en la estereolitografía únicamente se pueden emplear polímeros foto curables, sin embargo, es evidente el gran número de combinaciones posibles que se pueden configurar al variar los materiales y los procesos [37].

3. Parámetros de proceso

Al igual que en el diseño con materiales compuestos producidos de manera tradicional, las propiedades de las partes producidas mediante AM dependen de la fracción volumétrica de fibras, la disposición y ángulo de las fibras y las propiedades mecánicas de las fases de refuerzo y matriz [38]. Además de los materiales y el proceso escogido, otro factor que altera las propiedades mecánicas en compuestos producidos por AM son las posibles variaciones de los parámetros del proceso.

Debido al fenómeno de fusión y solidificación de la matriz polimérica termoplástica, el FDM presenta nuevos parámetros de proceso a considerar [39]. Se ha encontrado que los parámetros particulares de la manufactura aditiva que afectan las propiedades mecánicas son: espesor de capa, velocidad de alimentación [40], dirección de construcción y

temperatura del extrusor [41], siendo dependientes los dos primeros. La orientación de la dirección de construcción es uno de los parámetros que más afecta las partes [42]. La Figura 2 muestra diferentes orientaciones para una pieza propuesta, donde cada una tendrá valores de rigidez y resistencia únicos.

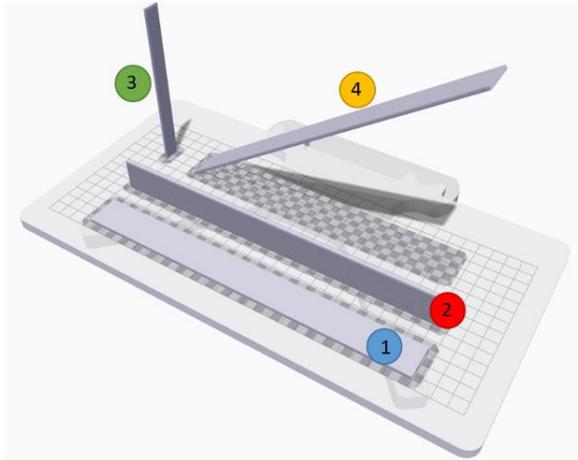


Figura 2. Posibles orientaciones de una pieza.
Fuente: elaboración propia.

La dirección de impresión óptima, aquella con mayor resistencia [43], para el caso de esta pieza será la número 1, orientación plana con el extrusor imprimiendo de forma longitudinal, o la número 2, en el borde. Esto se debe a que las porosidades se encuentran orientadas de forma que minimizan su afectación, como se presenta más adelante en las ecuaciones (1-7).

Por otra parte, el espesor afecta el tiempo de impresión, un menor espesor requerirá de mayor tiempo de impresión, pero producirá un mejor acabado superficial y mayor tolerancia geométrica. Un espesor de capa menor en general producirá un tamaño de porosidad menor [20], lo que disminuirá la tendencia al progreso del daño. También puede incrementar la adherencia interlaminar, produciéndose partes más resistentes con el decremento del espesor de capa.

La temperatura de impresión afecta el proceso de fusión y solidificación, además la viscosidad del polímero es función de su temperatura. Una temperatura muy alta creará mayores contracciones al solidificar pudiéndose generar grandes poros y además gases del exterior podrían entrar [44]. Una temperatura muy baja dificultará la consolidación de la pieza, pero los esfuerzos térmicos serán más reducidos. En general, la temperatura óptima dependerá del material, del tamaño de la pieza y de las condiciones térmicas.

La fibra, tanto el tipo como la fracción volumétrica, es uno de los parámetros que más afecta las propiedades mecánicas y mecanismos de falla de las partes compuestas fabricadas aditivamente [45]. La orientación de fibra es el ángulo respecto al eje x y es la fuente principal de la anisotropía de los compuestos, la rigidez y resistencia serán mayor en la dirección de las fibras. Una mayor fracción volumétrica de fibras creará piezas más rígidas y resistentes, pero menos dúctiles y, en general, puede ocurrir falla frágil, como se muestra en la Figura 5. Los mecanismos de falla y daño progresivo también se ven afectados, sin embargo, las ventajas de reforzar con fibras suelen superar los inconvenientes.

4. Caracterización mecánica y física

El proceso y los mecanismos de falla de los materiales se encuentran ligados a las propiedades mecánicas. Diversos autores han investigado las propiedades de polímeros producidos por modelado por deposición fundida [20], [40]. Se ha encontrado que, debido al proceso de solidificación, existen porosidades entre las capas que afectan las propiedades mecánicas. Estas porosidades están orientadas en el sentido de impresión del cabezal extrusor y, usualmente, de forma triangular [22], generando una anisotropía del material, incluso cuando se trata de un polímero isótropo.

El proceso de manufactura crea unas condiciones generadoras de anisotropía, de manera similar a la que presentan los materiales compuestos reforzados por fibras [43]. Es por esto por lo que la ecuación constitutiva suele representarse con un modelo ortótropo.

Rodríguez *et al.* [20] cuantificaron este número de porosidades basados en estudios microestructurales con microscopio electrónico, y generaron modelos de comportamiento mecánico a partir de métodos de homogenización numéricos, como el método de elementos finitos, o analíticos, como la homogenización asintótica.

Las propiedades mecánicas determinadas mediante modelos analíticos, recopilados por Gibson y Ashby [46], parecen abarcar únicamente el estudio de la rigidez. Las ecuaciones (1-7) muestran la forma en que se comportan regiones sólidas de matriz de PLA:

$$E_1 = (1 - p_1)E_s \quad (1)$$

$$E_2 = (1 - \sqrt{p_1})E_s \quad (2)$$

$$E_3 = E_2 \quad (3)$$

$$G_{12} = G \frac{(1 - p_1)(1 - \sqrt{p_1})}{(1 - p_1) + (1 - \sqrt{p_1})} \quad (4)$$

$$G_{23} = (1 - \sqrt{p_1})G \quad (5)$$

$$v_{12} = v_{13} = (1 - p_1)v \quad (6)$$

$$v_{23} = (1 - \sqrt{p_1})v \quad (7)$$

Donde p_1 es el valor de la porosidad, E_s y ν son los valores de módulo de rigidez y coeficiente de Poisson de la matriz, G representa el módulo de cizalladura, los subíndices 1 y 2 son direcciones en el plano de impresión y son paralelos a las fibras y a 90° , respectivamente. El subíndice 3 indica la dirección paralela al espesor del componente. Esta dirección prevalente de las porosidades, afectada por la dirección de impresión puede llevar a pensar que existe una dirección óptima de impresión de una parte. La dirección óptima de impresión es investigada por Chacón *et al.* [41], [43], estudiando la influencia de diversos parámetros como la dirección de impresión, el espesor de la capa y el patrón de llenado en la rigidez y resistencia de los modelos.

Las piezas de manufactura aditiva de fibras de material compuesto no suelen presentar refuerzo en toda su sección transversal, sino únicamente en las áreas donde es más crítico su empleo. Es por esto que se encuentran diversas regiones como [45], [47]: *i*) matriz sólida, 100% llena sin considerar las porosidades intrínsecas y los defectos del material, *ii*) patrones de llenado huecos, que son estructuras celulares que dan soporte, pero sin resistencia, aligerando la pieza y permitiendo un menor tiempo de impresión y *iii*) regiones reforzadas por fibras continuas.

Para realizar la caracterización del conjunto formado por las tres regiones, Melenka *et al.* [45] proponen el uso del método de rigidez de volumen promedio (VAS) para el cálculo de propiedades mecánicas elásticas. En [47] se comparan los resultados de las propiedades mecánicas con valores experimentales y se realizan análisis micrográficos de la sección transversal, ver Figura 3. Otros estudios de tensión fueron realizados por Van der Klift *et al.* [48] para partes impresas en MarkForged, mostrando que para piezas reforzadas con fibra de carbono, la regla de mezclas predice bastante bien la rigidez longitudinal. Hart *et al.* [49] revisaron la influencia de algunos parámetros de proceso, como la dirección de impresión y la dirección del refuerzo, encontrando que la dirección de impresión tiene un efecto significativo en la rigidez y resistencia, al comparar probetas de refuerzo orientado a 90° . La probeta con mejor desempeño fue aquella impresa en el plano y con refuerzo paralelo a la aplicación de la carga.

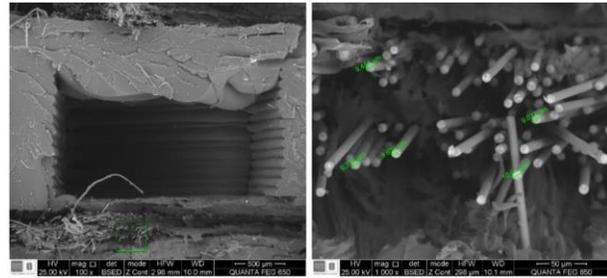


Figura 3. Micrografías de parte impresa en 3d: (a) sección transversal, (b) acercamiento, se observa desprendimiento de fibras. Fuente: [47]

Argüello-Bastos *et al.* [50], [51] también presentaron la caracterización a compresión de estas piezas, al variar: el tipo de patrón de llenado, la orientación de las fibras y el número de capas de estas. Además, presentaron imágenes de microscopía electrónica en donde se evidencian los mecanismos de daño de compresión como la delaminación por pandeo, fractura de fibras y bandas de pliegue, como se muestra en la Figura 4.

Hou *et al.* [52] desarrollaron estructuras de paneles tipo sándwich que fueron evaluadas a compresión, mostrando mecanismos de falla como pandeo local, propio de estructuras de este tipo. Sin embargo, los defectos aquí explicados son generales y se aplican a las zonas del material más que a una estructura en concreto.

Todas estas propiedades suelen estar referenciadas a materiales nuevos, sin embargo, como lo indican Chabaud *et al.* [53], existe una afectación de las propiedades debido a la absorción de humedad por la matriz, efecto conocido como higroscopia.

En cuanto a la fracción volumétrica, Justo *et al.* [25] realizaron un proceso de calcinación de los filamentos para obtener la fracción volumétrica de fibras, que es del 40% en peso para fibra de vidrio y 50% para fibra de carbono, lo que representa cerca del 30% en fracción volumétrica. Diferentes autores [53], [54] encontraron resultados similares usando tratamiento de imágenes en micrografías del filamento reforzado. Asimismo, Justo *et al.* [25] realizaron procesos de caracterización a compresión y tensión para partes con refuerzo de fibra de carbono y de vidrio; y cortante en el plano para partes con refuerzo de fibra de vidrio.

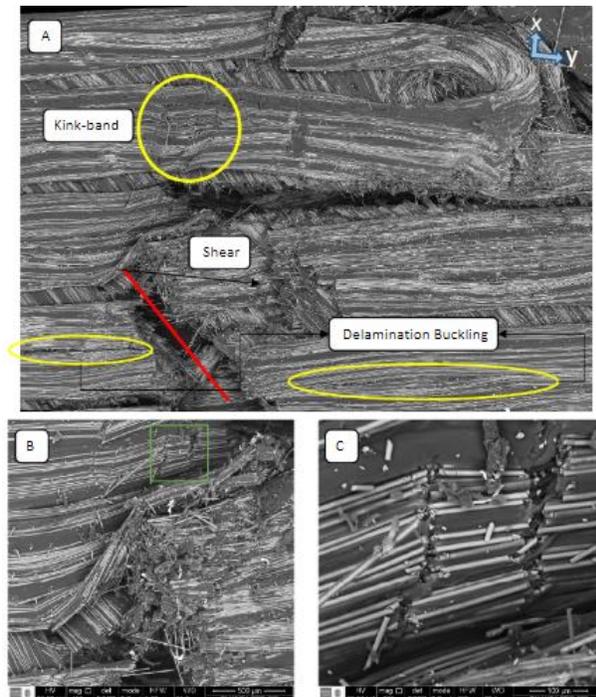


Figura 4. (a) Vista superior de la falla de fibras orientada a 30° , (b) modo de falla dislocación o barrido (c) fractura de bandas de pliegue. Fuente: [50].

La Figura 5 muestra las diferentes tipologías de la falla halladas en ensayos de tracción. Se observa en la Figura 5(a) la falla de la probeta con refuerzo de fibra de carbono orientado a 0° , se trata de una falla translaminar con rotura de fibras en una superficie perpendicular a la aplicación de la carga. La falla, indican los autores, fue explosiva debido al comportamiento frágil que poseen las fibras de carbono. Para refuerzo de fibra de vidrio a 0° , Figura 5 (b), se observa una falla tipo “madera verde”, en donde las fibras tuvieron diferentes regiones de rompimiento, provocado por una menor diferencia de rigideces y además por grietas interlaminares de sentido longitudinal. La Figura 5(c) muestra la falla en una probeta con orientación de fibras a 90° , la falla es debida al rompimiento de la matriz por una grieta interlaminar.

La Figura 6 presenta las fallas por compresión de las probetas con refuerzo de carbono, paralelo a la dirección de compresión se observa una falla a 35° . La Figura 7 muestra las fallas por compresión y esfuerzo cortante de las probetas reforzadas con fibra de vidrio. Para la compresión con refuerzo orientado a 0° , Figura 7(a), se observa un comportamiento similar al de la prueba con fibra de carbono. La Figura 7(b) evidencia una falla debido a una grieta transversal, al parecer por un defecto local que causa el pandeo de la probeta. En la Figura 7(c), la fibra está orientada a $\pm 45^\circ$, la falla por cizalladura muestra una forma de curva convexa, consistente con la

alineación de los esfuerzos con la orientación del refuerzo a 45° de la probeta, efecto denominado “tijera”. Estudios similares de tensión fueron llevados a cabo usando refuerzos de fibras cortas de carbono [28], [55] variando el patrón de relleno. En [56], [57] se recopilan los trabajos presentados por diversos autores, las pruebas empleadas y los valores hallados de cada una de las propiedades mecánicas.

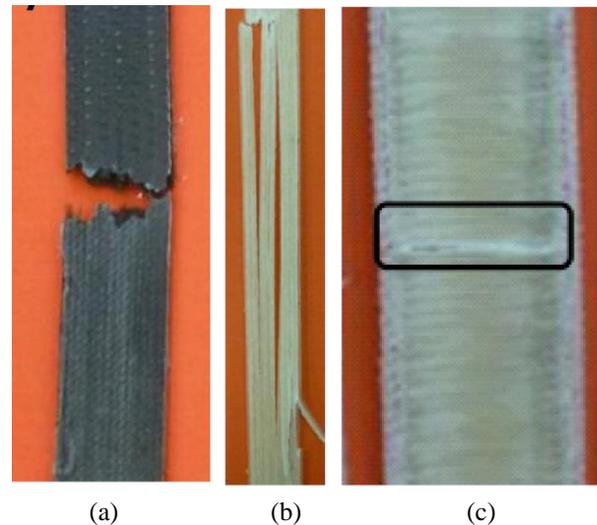


Figura 5. Fractura por tensión. (a) compuesto de fibra de carbono a 0° , (b) compuesto de fibra de vidrio a 0° , (c) compuesto de fibra de vidrio a 90° . Fuente: [58].



Figura 6. Falla por compresión compuesto de fibra de carbono a 0° . Fuente: [58].

Por otro lado, según como se presentan las fallas en las láminas, se pueden dividir en: fractura interlaminar, intralaminar y translaminar. Interlaminar se refiere

cuando existen grietas en la fase de la matriz [59], intralaminar es el desprendimiento de láminas adyacentes [60], también conocido como delaminación. y translaminar implica una falla catastrófica de la lámina y corte de las fibras [61].

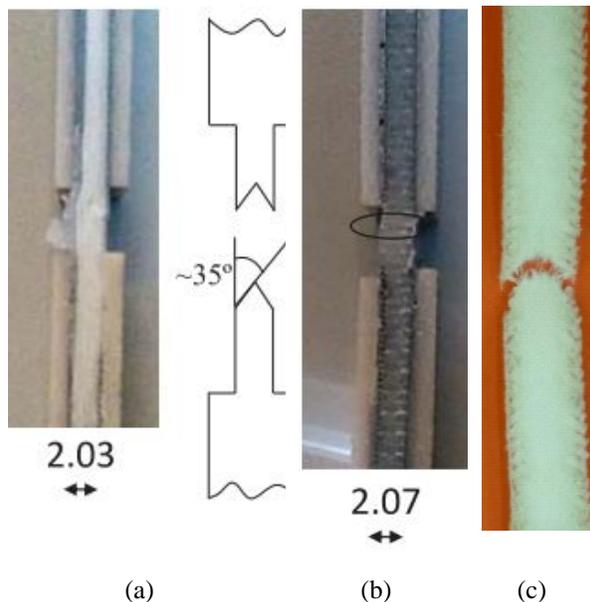


Figura 7. Falla por compresión en compuesto de fibra de vidrio: (a) orientación a 0° , (b) con defecto transversal, (c) orientación a $\pm 45^\circ$. Fuente: [58].

Estudios de las propiedades de la resistencia interlaminar que precede al fenómeno de delaminación [59], [62], [63], han encontrado que existe un efecto significativo del espesor de la capa. La resistencia interlaminar a la cizalla (ILSS) decrece al aumentar el espesor, además, el tipo y contenido de refuerzo fue evaluado, mostrando marcadas diferencias según la naturaleza de las fibras. Bitar *et al.* [64] realizaron pruebas de tracción en la dirección z , normal al plano del laminado, como método directo para evaluar la resistencia al desgarro interlaminar (ILTS).

En los procesos de delaminación uno de los factores importantes es la tenacidad a la fractura en el modo I. Goh y Yeong [65] realizaron pruebas DCB (*double cantilever beam*), encontrando que la tenacidad mejora al aumentar la temperatura del extrusor y de la plataforma y disminuir la velocidad de impresión. La disminución de las propiedades de resistencia interlaminar fue discutida sobre la base de análisis fractográfico. Por otro lado, pruebas experimentales han determinado que la tenacidad a la fractura mejora con el refuerzo localizado de fibras de carbono, esto implica que es posible generar

estructuras con propiedades objetivo en diferentes zonas de la estructura [66].

Dutra *et al.* [56] evaluaron las propiedades mecánicas de la sección reforzada mediante una técnica de homogenización asintótica, mostraron además que las propiedades de la matriz de Nylon de refuerzo son diferentes a las del filamento 100% de Nylon. En otro estudio, los mismos autores determinaron el efecto de algunos parámetros de proceso en la resistencia interlaminar al cortante, parámetro clave al momento de existir delaminación [67]. Swolfs y Pinho [61] proponen un método de optimización mediante elementos finitos para generar microestructura que mejoran la tenacidad a la fractura translaminar.

El estudio de la fatiga se ha abordado en Imeri *et al.* [68] con diferentes arquitecturas de construcción: usando una disposición concéntrica e isotropa del refuerzo de las fibras. Varios autores [69], [70] han estudiado el efecto de la orientación de la fibra en la resistencia a la fatiga, y la influencia del patrón de llenado [70] en la morfología de la falla, según se muestra en la Figura 8. Ziemann *et al.* [71] caracterizaron la degradación causada por la fatiga usando un modelo de mecánica del daño continuo.

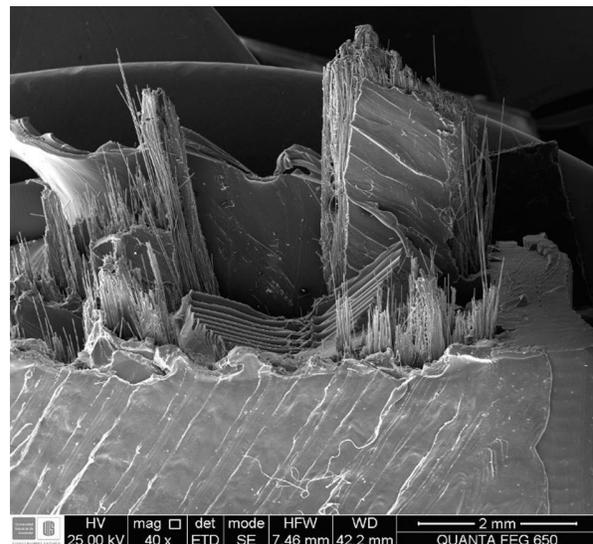


Figura 8. Imagen SEM de fractura por fatiga de espécimen con relleno triangular de 20%, y refuerzo de fibra de carbono orientado a 0° al 80% de la resistencia última. Fuente: [70].

El contacto y las propiedades tribológicas de partes impresas en 3D han sido estudiadas por Giemza *et al.* [72], sin embargo, los autores no pudieron encontrar estudios específicos a partes FRAM. Caminero [73] estudió la influencia de 4 parámetros como son la arquitectura de la impresión (dirección de construcción),

el tipo de fibra: carbono, Kevlar o de vidrio, el contenido de fibra como fracción volumétrica y el espesor de la capa en la resistencia al impacto de piezas FRAM.

La combinación de refuerzo de fibras cortas con fibras largas puede generar piezas aún más resistentes. En Naranjo-Lozada *et al.* [74], se estudió la influencia de la fracción volumétrica de fibras, la arquitectura de impresión, los patrones de relleno y la densidad de los mismos, y las propiedades a tracción de las partes impresas en 3D usando un diseño experimental ANOVA. El efecto de las propiedades de las mismas 4 propiedades: patrón de refuerzo, distribución del refuerzo, orientación de la impresión y fracción volumétrica de las fibras fueron estudiadas por Araya *et al.* [75] a compresión y a flexión usando prueba de flexión de 3 puntos.

Mei *et al.* [76] realizan un estudio similar de la variación de parámetros pero con el uso de 3 fibras de refuerzo diferentes: carbono, vidrio y aramida. Argawal *et al.* [77] estudian los mismos 4 parámetros más la categoría del refuerzo: isotrópico o concéntrico, realizando un diseño de experimento Taguchi para el análisis estadístico. Kvalsvig *et al.* [78] usan también Taguchi para evaluar los parámetros principales que afectan las propiedades a la tracción.

En lo que concierne a la caracterización física de los defectos, Ning *et al.* [79] estudiaron las porosidades en partes FRAM y su morfología al cambiar el contenido de fibra. Estas se dividen según su causa en: poros generados durante la fabricación del filamento, poros debidos a la separación física entre las capas de deposición y poros debido al arranque de fibras o defectos en la interfaz fibra-matriz. Por otro lado, resulta interesante que interrumpir la operación de manufactura aditiva pueda afectar la resistencia de la pieza. Sinha y Meisel [80] estudiaron este fenómeno, donde el cambio en la resistencia se asocia al enfriamiento y al rol de los esfuerzos térmicos inducidos.

Los métodos experimentales más usados en los artículos analizados son el SEM, la micrografía óptica, la correlación digital de imágenes, la emisión acústica, emisión de ultrasonido y los ensayos destructivos. Oztan *et al.* [44] se interesaron por la relación entre las propiedades mecánicas y la microestructura del material, encontrando por medio de imágenes SEM que existen vínculos entre ambos. Por otra parte, la investigación de Goh *et al.* [81] se centra en la microestructura de la falla, al analizar los mecanismos de daño al producirse la falla por cargas de tracción, flexión y dureza.

Las propiedades dinámicas como la termofluencia han sido estudiadas por Mohammadzadeh *et al.* [82]

mediante análisis mecánico dinámico (DMA), un análisis de la microestructura también es presentado. Para monitorear los cambios de temperatura y deformación tanto en la fabricación como en el servicio, Kousiatza *et al.* [60] han empleado el uso de sensores Bragg, logrando medir efectivamente el coeficiente de expansión térmica y demostrando su alta dependencia a la orientación de la fibra.

Pyl *et al.* [83] realizaron ensayos de agujero abierto (*open hole*) a partes de material compuesto producidas por AM, en donde se investiga la arquitectura del refuerzo, pudiendo ser este de forma concéntrica alrededor del agujero o de refuerzo isotrópico y luego recortado. Se observa que el valor de la resistencia última y el mecanismo de daño dependen en gran medida de la configuración escogida.

Turk *et al.* [84] presenta una síntesis diferente entre la manufactura aditiva y el diseño de materiales compuestos, pues la manufactura aditiva puede servir como elementos potenciadores de métodos tradicionales de manufactura de compuestos.

5. Modelos numéricos y analíticos

Debido a la multiplicidad de parámetros de manufactura, la tarea de generar modelos para partes FRAM es compleja. Para la caracterización de la rigidez de las partes Melenka *et al.* [45] propusieron el método VAR, en donde se divide la parte en diferentes zonas de acuerdo con el material empleado y luego se realiza la ponderación de la matriz de rigidez C como lo muestra la ecuación (8):

$$[C]^g = V_{f,capa}[C_{capa}] + V_{f,patrón}[C_{i,patrón}] + V_{f,sólido}[C_{sólido}] + V_{f,fibra}[C_{fibra}], \quad (8)$$

donde C_i hace referencia a la matriz de rigidez y $V_{f,i}$ a la fracción en volumen de cada región i : capas exteriores sólida, con refuerzo de fibra, y patrón de llenado.

Por otra parte, la resistencia es un factor que no se puede ponderar de forma similar. Por esto, para materiales compuestos se han empleado criterios de falla como Hashin, Tsai-Hill, Hoffman, entre otros [85]. Sin embargo, no se han desarrollado o empleado los mismos criterios con variaciones de los parámetros de proceso en las partes FRAM.

El modelado del proceso de manufactura puede dar indicios del fallo de las estructuras y generar maneras más eficientes de producir partes de AM. En el trabajo de

[86] se realiza un modelado del proceso de extrusión de fibras cortas y fibras largas usando un enfoque de elementos discretos e hidrodinámica suave de partículas (SPH).

La optimización topológica tiene un vínculo fuerte con la AM en el cambio del paradigma del diseño, pues permiten el diseño y construcción de estructuras complejas altamente eficientes. Los procesos de optimización topológica que tienen en cuenta la anisotropía generada por el proceso han sido ya empleados en [87]. Más aún, según Meneses *et al.* [88], la AM promete ser el puente entre la optimización topológica y el producto final, al eliminar en gran medida la restricción de la complejidad geométrica impuesta por procesos de fabricación tradicionales.

La resistencia de una parte está ligada no solo al fallo de la primera capa, sino a la evolución que presenta el daño al propagarse por las diferentes capas o láminas de material compuesto [89]. El análisis del daño progresivo ha sido empleado en materiales compuestos con manufactura tradicional para predecir este fenómeno.

En la mecánica del daño continuo, el daño se presenta con una variable fenomenológica, generalmente asociada al cambio de algún parámetro mecánico o geométrico como la rigidez o el área resistente efectiva. Es conveniente a veces medir el daño interno en las estructuras de material compuesto, usando, p.ej., emisión acústica, ultrasonido multielemento (*phase array*) [90], etc., como medio para la determinación de defectos internos. Otros trabajos [91] tratan de cerrar la brecha entre la micromecánica y la macroestructura mediante el empleo de enfoques multiescala.

Según lo expuesto anteriormente, el proceso de modelado numérico es casi mandatorio si se requiere conocer la rigidez o resistencia de una pieza antes de ensayarla. Diversos autores han propuesto esquemas de análisis usando el método de elementos finitos [42], [92] para determinar las propiedades. Es así como en [93] se muestran modelos numéricos que logran entender mejor el comportamiento del campo de deformación de una pieza producida por FDM frente a una carga. Aunque este trabajo se realizó en ABS, y no un material compuesto, representa un avance en el modelado de los defectos generados por el extrusor y la estrategia de deposición.

Ferreira *et al.* [94] analizaron mediante elementos finitos materiales cuya disposición de fibras continuas son curvas en el plano de construcción, lográndose zonas con rigidez variable. Una regla de diseño sería la colocación de los refuerzos en las zonas de tensión máxima, o a lo largo del flujo de tensiones.

Abadi *et al.* [95] compararon resultados obtenidos analíticamente mediante el empleo del método de VAS, con resultados numéricos mediante el método de elementos finitos, usando el modelo de daño presentado en [96]. La validación se realiza con pruebas de tracción en partes 3D compuestas. Métodos más avanzados para predecir las propiedades mecánicas se resumen y evaluaron por Vignoli *et al.* [97].

6. Perspectivas futuras

Siendo una tecnología tan reciente, un panorama de las posibles aplicaciones es aún reducido. Se está trabajando en superar las desventajas del método, como bajo volumen de fabricación y alto tiempo de impresión, aunque los costos de impresión son, virtualmente, los mismos para una como para miles de piezas [98]. También deberán hacerse esfuerzos por comprender mejor los mecanismos de falla y desarrollar modelos para predecirlos, los cuales sean más completos y que incluyan la caracterización de estructuras de relleno y la anisotropía de la pieza.

El empleo de la impresión 4D está llegando también a los materiales compuestos, particularmente en la manufactura de estructuras con memoria de forma. En este tipo de manufactura se producen estructuras poliméricas que se desdoblán por medios como corrientes eléctricas [99]. Estos materiales y procesos seguramente empujarán la necesidad de construcción de modelos de predicción de daño aún más complejos.

La tendencia será hacia aumentar las dimensiones de la pieza, como en la AM de grandes áreas (BAAM, por sus siglas en inglés) [100] y a disminuir el tiempo de impresión, como en tecnologías HARP (*high speed and area rapid prototyping*).

7. Conclusiones

Se presenta el estado del arte en daño y caracterización de materiales compuestos reforzados por fibra producidos por manufactura aditiva. Se mostraron los métodos por el cual se realizan y los parámetros que influyen en las propiedades mecánicas de las piezas construidas, como la fracción volumétrica de fibras y tipo, espesor de la capa, y dirección de impresión.

Se detallan las últimas investigaciones en la caracterización mecánica a diversos tipos de carga: tracción, compresión, fatiga, contacto, impacto, teniendo en cuenta algunos efectos como la temperatura y humedad y termofluencia. Además de la caracterización física de las piezas FRAM, enfocada hacia el conocimiento de las porosidades. Estos trabajos dan

cuenta de la complejidad del problema al considerar los parámetros de manufactura como un factor influyente en las propiedades físico-mecánicas de las partes.

El desafío está en considerar la relación entre los parámetros de manufactura y las propiedades mecánicas, se tiene un entendimiento cualitativo de los efectos que tienen ciertos parámetros como el espesor de capa y la dirección de impresión en la rigidez y resistencia de la pieza, pero un modelo que logre cuantificar estos efectos no está aún desarrollado. Por otra parte, se comprende mejor el papel de la fracción volumétrica de fibras en las propiedades mecánicas, pero su rol en los mecanismos de daño y la morfología de éstos es aún materia de investigación.

Las complejidades del proceso, la dificultad de cuantificar las propiedades y de evaluar el daño quizás están a la par con las posibilidades de innovación y nuevas aplicaciones que ofrece el diseño de materiales compuestos con manufactura aditiva. Cuando se entienda mejor el proceso se diseñarán mejores partes, y el diseño de partes innovadoras expandirá las fronteras de aplicación y demandarán nuevos métodos de análisis más confiables.

Referencias

- [1] M. Bronz and S. Karaman, "Preliminary Experimental Investigation of Small Scale Propellers at High Incidence Angle," in *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2018, no. January, pp. 1–10. doi: 10.2514/6.2018-1268
- [2] W. M. Van Den Brink, F. Van Der Klift, R. Bruins, and M. J. M. Hermans, "Design and optimization method for 3D printed carbon reinforced aircraft components," in *ICCM International Conferences on Composite Materials*, 2017, vol. 2017, pp. 20–32.
- [3] A. V. Azarov, F. K. Antonov, M. V. Golubev, A. R. Khaziev, and S. A. Ushanov, "Composite 3D printing for the small size unmanned aerial vehicle structure," *Compos. Part B Eng.*, vol. 169, pp. 157–163, 2019. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.073
- [4] M. Lizut and M. K. Wojs, "Research on clutch lever of ktm motorcycle produced by using 3d printing," *Proc. Inst. Veh.*, no. z. 1/110, pp. 119–126, 2017.
- [5] R. Brünler, D. Aibibu, M. Wöltje, A. M. M. Anthofer, and C. Cherif, "In silico modeling of structural and porosity properties of additive manufactured implants for regenerative medicine," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 76, pp. 810–817, 2017.
- [6] Grand View Research, *Composites Market Size, Share & Trends Analysis Report*. San Francisco, CA, USA: Grand View Research, Inc, 2018.
- [7] Q. Yang and B. Cox, "Cohesive models for damage evolution in laminated composites," *Int. J. Fract.*, vol. 133, no. 2, pp. 107–137, May 2005.
- [8] C. W. Hull, "Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography," United States Patent 4575330A1986.
- [9] S. S. Crump, "Apparatus and method for creating three-dimensional objects," United States Patent 51213291992.
- [10] L. G. Blok, M. L. Longana, H. Yu, and B. K. S. Woods, "An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites," *Addit. Manuf.*, vol. 22, pp. 176–186, 2018.
- [11] H. Brooks and S. Molony, "Design and evaluation of additively manufactured parts with three dimensional continuous fibre reinforcement," *Mater. Des.*, vol. 90, pp. 276–283, Jan. 2016.
- [12] G. Thomas, M. Antoni, and S. Gozdz, "Three dimensional printer with composite filament fabrication," United States Patent 9156205B22015.
- [13] G. Udupa, S. S. Rao, and K. V. Gangadharan, "Functionally Graded Composite Materials: An Overview," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 1291–1299, 2014.
- [14] Y. Hu and W. Cong, "A review on laser deposition-additive manufacturing of ceramics and ceramic reinforced metal matrix composites," *Ceramics International*, vol. 44, no. 17. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., pp. 20599–20612, 2018.
- [15] E. Martínez, O. A. González-Estrada, and A. Martínez, "Evaluación de las propiedades tribológicas de materiales compuestos de matriz metálica (MMCs) procesados por técnicas de fabricación aditiva con haz láser (SLM)," *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 1, pp. 101–114, 2017. doi: 10.18273/revuin.v16n1-2017010
- [16] A. N. Dickson, K. A. Ross, and D. P. Dowling, "Additive manufacturing of woven carbon fibre polymer composites," *Compos. Struct.*, vol. 206, pp. 637–643, 2018.
- [17] W. D. Zhou and J. S. Chen, "3D Printing of

Carbon Fiber Reinforced Plastics and their Applications,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 913, pp. 558–563, Feb. 2018.

- [18] C. Mahajan and D. Cormier, “3D printing of carbon fiber composites with preferentially aligned fibers,” in *IISE Annual Conference and Expo 2015*, 2015, pp. 2953–2962.
- [19] C. Ciftci and H. S. Sas, “A rational utilization of reinforcement material for flexural design of 3D-printed composite beams,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 38, no. 23–24, pp. 1040–1054, 2019.
- [20] J. F. Rodríguez, J. P. Thomas, and J. E. Renaud, “Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 219–230, 2003.
- [21] W. Zhu, C. Yan, J. Yang, S. Wen, and Y. Shi, “Parameter Optimization for Preparing Carbon Fiber/Epoxy Composites by Selective Laser Sintering,” in *Symposium of 2015 Annual International Solid Freeform Fabrication*, 2015, pp. 2–4.
- [22] P. Parandoush and D. Lin, “A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites,” *Compos. Struct.*, vol. 182, pp. 36–53, 2017.
- [23] M. Eichenhofer, J. I. Maldonado, F. Klunker, and P. Ermanni, “Analysis of Processing Conditions for a Novel 3D-Composite Production Technique,” in *20th International Conference on Composite Materials*, 2015, pp. 1–12.
- [24] A. Avdeev *et al.*, “Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition,” *Machines*, vol. 7, no. 3, p. 57, 2019.
- [25] J. Justo, L. Távara, L. García-Guzmán, and F. París, “Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites,” *Compos. Struct.*, vol. 185, pp. 537–548, Feb. 2018.
- [26] Y. Tu, Y. Tan, F. Zhang, J. Zhang, and M. A. Guofeng, “Shearing algorithm and device for the continuous carbon fiber 3D printing,” *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf.*, vol. 13, no. 1, 2019.
- [27] L. Warnung, S. Estermann, and A. Reisinger, “Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing Materials,” *RTEjournal - Forum für Rapid Technol.*, no. 15, pp. 1–18, 2018.
- [28] F. Bárnik, M. Vaško, M. Sága, M. Handrik, and A. Sapietová, “Mechanical properties of structures produced by 3D printing from composite materials,” *MATEC Web Conf.*, vol. 254, p. 01018, Jan. 2019. doi: 10.1051/mateconf/201925401018
- [29] G. Dong, Y. Tang, D. Li, and Y. F. F. Zhao, “Mechanical Properties of Continuous Kevlar Fiber Reinforced Composites Fabricated by Fused Deposition Modeling Process,” *Procedia Manuf.*, vol. 26, pp. 774–781, 2018.
- [30] R. Calderón-Villajos, A. J. López, L. Peponi, J. Manzano-Santamaría, and A. Ureña, “3D-printed self-healing composite polymer reinforced with carbon nanotubes,” *Mater. Lett.*, vol. 249, pp. 91–94, 2019. doi: 10.1016/j.matlet.2019.04.069
- [31] T. Isobe, T. Tanaka, T. Nomura, and R. Yuasa, “Comparison of strength of 3D printing objects using short fiber and continuous long fiber,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 406, no. 1, p. 012042, Sep. 2018.
- [32] Q. Hu, Y. Duan, H. Zhang, D. Liu, B. Yan, and F. Peng, “Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament,” *J. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 1887–1898, 2018.
- [33] R. Matsuzaki *et al.*, “Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 23058, Sep. 2016.
- [34] Y. Ibrahim, G. W. Melenka, and R. Kempers, “Additive manufacturing of Continuous Wire Polymer Composites,” *Manuf. Lett.*, vol. 16, pp. 49–51, Apr. 2018.
- [35] A. N. Dickson and D. P. Dowling, “Enhancing the bearing strength of woven carbon fibre thermoplastic composites through additive manufacturing,” *Compos. Struct.*, vol. 212, pp. 381–388, Mar. 2019.
- [36] Y. Swolfs and S. T. Pinho, “3D printed continuous fibre-reinforced composites: Bio-inspired microstructures for improving the translaminar fracture toughness,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 182, p. 107731, Sep. 2019.
- [37] E. D. Valbuena-Niño, J. L. Endrino-Armenteros, H. A. Estupiñan-Duran, B. Pérez-Gutiérrez, and A. Díaz-Lantada, “Caracterización microscópica de texturas superficiales fabricadas aditivamente mediante estereolitografía láser,” *Respuestas*, vol. 21, no. 2, p. 37, Jul. 2016.

- [38] A. Bandyopadhyay and B. Heer, "Additive manufacturing of multi-material structures," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 129, pp. 1–16, Jul. 2018.
- [39] I. Fidan *et al.*, "The trends and challenges of fiber reinforced additive manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 102, pp. 1801–1818, Jun. 2019.
- [40] R. Quelho de Macedo, R. T. L. Ferreira, and K. Jayachandran, "Determination of mechanical properties of FFF 3D printed material by assessing void volume fraction, cooling rate and residual thermal stresses," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 25, no. 10, pp. 1661–1683, Nov. 2019.
- [41] J. M. Chacón, M. A. Caminero, P. J. Núñez, E. García-Plaza, I. García-Moreno, and J. M. Reverte, "Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 181, p. 107688, Sep. 2019.
- [42] S. Ravindrababu, Y. Govdeli, Z. W. Wong, and E. Kayacan, "Evaluation of the influence of build and print orientations of unmanned aerial vehicle parts fabricated using fused deposition modeling process," *J. Manuf. Process.*, vol. 34, pp. 659–666, Aug. 2018.
- [43] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection," *Mater. Des.*, vol. 124, pp. 143–157, Jun. 2017.
- [44] C. Oztan *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of three dimensional-printed continuous fiber composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 2, pp. 271–280, 2019.
- [45] G. W. Melenka, B. K. O. Cheung, J. S. Schofield, M. R. Dawson, and J. P. Carey, "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures," *Compos. Struct.*, vol. 153, pp. 866–875, Oct. 2016.
- [46] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular solids: Structure and properties, second edition*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [47] O. A. González-Estrada, A. Pertuz, and J. E. Quiroga Mendez, "Evaluation of Tensile Properties and Damage of Continuous Fibre Reinforced 3D-Printed Parts," *Key Eng. Mater.*, vol. 774, pp. 161–166, 2018.
- [48] F. Van Der Klift, Y. Koga, A. Todoroki, M. Ueda, Y. Hirano, and R. Matsuzaki, "3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens," *Open J. Compos. Mater.*, vol. 06, no. 01, pp. 18–27, 2016.
- [49] R. J. J. Hart, E. G. G. Patton, and O. Sapunkov, "Characterization of Continuous Fiber-Reinforced Composite Materials Manufactured Via Fused Filament Fabrication," Warren, MI, 2018.
- [50] J. D. Argüello-Bastos, O. A. González-Estrada, C. A. Ruiz-Florián, A. D. Pertuz-Comas, and E. D. V-Niño, "Study of mechanical properties under compression failure in reinforced composite materials produced by additive manufacturing," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1126, p. 012005, Nov. 2018.
- [51] J. D. Argüello-Bastos, C. A. Ruiz-Florián, O. A. González-Estrada, A. D. Pertuz-Comas, and A. Martínez-Amariz, "Compression tests performed in reinforced rigid matrix composite varying the reinforcement material," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1126, p. 012007, Nov. 2018.
- [52] Z. Hou, X. Tian, J. Zhang, and D. Li, "3D printed continuous fibre reinforced composite corrugated structure," *Compos. Struct.*, vol. 184, pp. 1005–1010, 2018.
- [53] G. Chabaud, M. Castro, C. Denoual, and A. Le Duigou, "Hygromechanical properties of 3D printed continuous carbon and glass fibre reinforced polyamide composite for outdoor structural applications," *Addit. Manuf.*, vol. 26, pp. 94–105, Mar. 2019.
- [54] M. Mohammadzadeh, A. Imeri, I. Fidan, and M. Elkelany, "3D printed fiber reinforced polymer composites - Structural analysis," *Compos. Part B Eng.*, vol. 175, p. 107112, 2019.
- [55] R. Walter, K. Friedrich, and M. Gurka, "Characterization of mechanical properties of additively manufactured polymers and composites," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1981, p. 020033.
- [56] T. A. Dutra, R. T. L. Ferreira, H. B. Resende, and A. Guimarães, "Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 133, pp. 1–15, Mar. 2019.

- [57] J. G. Diaz, J. S. Leon, O. A. González-Estrada, and A. Pertuz, "Analytical review of mechanical properties composites for 3D printed components," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. submitted, 2020.
- [58] M. J. Mesa Quezada, "Puesta a punto de un sistema de fabricación aditiva para materiales compuestos," Universidad de Sevilla, Sevilla, 2015.
- [59] M. A. Caminero, J. M. Chacón, I. García-Moreno, and J. M. Reverte, "Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling," *Polym. Test.*, vol. 68, pp. 415–423, 2018.
- [60] C. Kousiatza, D. Tzetzis, and D. Karalekas, "In-situ characterization of 3D printed continuous fiber reinforced composites: A methodological study using fiber Bragg grating sensors," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 174, pp. 134–141, 2019.
- [61] Y. Swolfs and S. T. T. Pinho, "Designing and 3D Printing Continuous Fibre-Reinforced Composites with a High Fracture Toughness," in *Proceedings of the American Society for Composites: Thirty-first Technical Conference*, 2016, pp. 1–7.
- [62] F. García Móstoles, M. R. Martínez Miranda, B. López, E. Guinaldo Fernández, A. Torres Salas, and A. Jara, "Análisis de ensayos de ILSS de probetas de material compuesto reforzadas con fibra continua producidas mediante impresión 3D," *Mater. compuestos*, vol. 2, no. 1, pp. 97–101, 2018.
- [63] A. C. Paredes, O. Bohórquez, A. Pertuz, Y. Rueda, and O. A. González-Estrada, "Interlaminar tensile strength for composite materials made by additive manufacturing," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1386, no. 012002, pp. 1–8, 2019.
- [64] I. S. S. Bitar, N. T. T. Aboulkhair, and R. Leach, "The application of composite through-thickness assessment to additively manufactured structures," *Solid Free. Fabr. Symp.*, 2017.
- [65] G. D. Goh and W. Y. Yeong, "Mode I interlaminar fracture toughness of additively manufactured carbon fibre thermoplastic," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing*, 2018, pp. 505–510.
- [66] F. Akasheh and H. Aglan, "Fracture toughness enhancement of carbon fiber-reinforced polymer composites utilizing additive manufacturing fabrication," *J. Elastomers Plast.*, vol. 51, no. 7–8, pp. 698–711, Nov. 2019.
- [67] T. Dutra and H. Resende, "Interlaminar shear strength of continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites manufactured by 3D printing," in *Proceedings of the 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 2017, pp. 1–9.
- [68] A. Imeri, I. Fidan, M. Allen, D. A. Wilson, and S. Canfield, "Fatigue analysis of the fiber reinforced additively manufactured objects," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 98, pp. 2717–2724, Oct. 2018.
- [69] A. Imeri, I. Fidan, M. Allen, and G. Perry, "Effect of Fiber Orientation in Fatigue Properties of FRAM Components," *Procedia Manuf.*, vol. 26, pp. 892–899, 2018.
- [70] A. D. Pertuz, S. Díaz-Cardona, and O. A. González-Estrada, "Static and fatigue behaviour of continuous fibre reinforced thermoplastic composites manufactured by fused deposition modelling technique," *Int. J. Fatigue*, vol. 130, p. 105275, 2020. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105275
- [71] C. W. Ziemian, R. D. Ziemian, and K. V. Haile, "Characterization of stiffness degradation caused by fatigue damage of additive manufactured parts," *Mater. Des.*, vol. 109, pp. 209–218, Nov. 2016.
- [72] B. Giemza, M. Domański, M. Deliś, and D. Kapica, "Tribological properties of 3D printed components," *J. KONBiN*, vol. 48, pp. 447–463, 2018.
- [73] M. A. Caminero, J. M. Chacón, I. García-Moreno, and G. P. Rodríguez, "Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling," *Compos. Part B Eng.*, vol. 148, pp. 93–103, 2018.
- [74] J. Naranjo-Lozada, H. Ahuett-Garza, P. Orta-Castañón, W. M. H. Verbeeten, and D. Sáiz-González, "Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 26, pp. 227–241, 2019.
- [75] M. Araya-Calvo *et al.*, "Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology," *Addit. Manuf.*, vol. 22, pp. 157–164, 2018.
- [76] H. Mei, Z. Ali, I. Ali, and L. Cheng, "Tailoring

strength and modulus by 3D printing different continuous fibers and filled structures into composites,” *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, vol. 2, no. 2, pp. 312–319, 2019.

[77] K. Argawal, M. Houser, S. Vangapally, and A. Kumar Vulli, “Process – Property relationships in additive manufacturing of nylon-fiberglass composites using Taguchi design of experiments,” in *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2017, pp. 399–412.

[78] A. Kvalsvig, X. Yuan, J. Potgieter, and P. Cao, “Analysing the tensile properties of 3D printed fibre reinforced thermoplastic composite specimens,” in *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, 2017, pp. 1–6.

[79] F. Ning, W. Cong, Y. Hu, and H. Wang, “Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties,” *J. Compos. Mater.*, vol. 51, no. 4, pp. 451–462, 2017.

[80] S. Sinha and N. A. Meisel, “Influence of process interruption on mechanical properties of material extrusion parts,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, no. 5, pp. 821–827, 2018.

[81] G. D. L. D. Goh *et al.*, “Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics,” *Mater. Des.*, vol. 137, pp. 79–89, 2018.

[82] M. Mohammadzadeh, I. Fidan, M. Allen, and A. Imeri, “Creep behavior analysis of additively manufactured fiber-reinforced components,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, no. 5–8, pp. 1225–1234, 2018.

[83] L. Pyl, K. A. A. Kalteremidou, and D. Van Hemelrijck, “Exploration of the design freedom of 3D printed continuous fibre-reinforced polymers in open-hole tensile strength tests,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 171, pp. 135–151, 2019.

[84] D.-A. Türk, R. Kussmaul, M. Zogg, C. Klahn, B. Leutenecker-Twelsiek, and M. Meboldt, “Composites Part Production with Additive Manufacturing Technologies,” *Procedia CIRP*, vol. 66, no. section 4, pp. 306–311, 2017.

[85] E. J. Barbero, *Finite Element Analysis of Composite Materials Using ANSYS*, 2nd ed. Boca Raton, Florida, U.S.A.: CRC Press, 2013.

[86] D. Yang, L. W. K. Wu, and Y. Sheng, “A Particle

Element Approach for Modelling the 3D Printing Process of Fibre Reinforced Polymer Composites,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 1, no. 1, p. 10, Sep. 2017.

[87] A. Garland and G. Fadel, “Optimizing Topology and Gradient Orthotropic Material Properties Under Multiple Loads,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 19, no. 2, p. 021007, 2019.

[88] G. A. Menezes, A. Pereira, and I. F. Menezes, “Lattice Structures Design by Means of Topology Optimization,” in *Congreso Argentino de Mecánica Computacional*, 2018, pp. 2111–2120.

[89] O. A. González-Estrada, J. S. León, and A. Pertuz, “Influence of the boundary condition on the first ply failure and stress distribution on a multilayer composite pipe by the finite element method,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1159, p. 012013, Jan. 2019.

[90] M. A. Caminero, I. García-Moreno, G. P. Rodríguez, and J. M. Chacón, “Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique: Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 165, pp. 131–142, 2019.

[91] O. Focke *et al.*, “Multiscale non-destructive investigations of aeronautic structures: from a single fiber to complex shaped fiber-reinforced composites,” in *8th Conference on Industrial Computed Tomography*, 2018, pp. 1–7.

[92] E. A. Papon, A. Haque, and S. B. Mulani, “Process optimization and stochastic modeling of void contents and mechanical properties in additively manufactured composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 177, p. 107325, 2019.

[93] A. Garg and A. Bhattacharya, “An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 120, pp. 225–236, 2017.

[94] R. T. L. Ferreira, I. A. Ashcroft, S. Li, and P. Zhuo, “Optimisation of Fibre-Paths in Composites Produced by Additive Manufacturing,” in *EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization*, Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 1083–1094.

[95] H. Al Abadi, H. T. Thai, V. Paton-Cole, and V. I. Patel, “Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures,” *Compos. Struct.*, vol. 193, no. February, pp.

8–18, 2018.

[96] I. Lapczyk and J. A. Hurtado, “Progressive damage modeling in fiber-reinforced materials,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 38, no. 11, pp. 2333–2341, 2007.

[97] L. L. Vignoli, M. A. Savi, P. M. C. L. Pacheco, and A. L. Kalamkarov, “Comparative analysis of micromechanical models for the elastic composite laminae,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 174, p. 106961, 2019.

[98] J. Z. Parrado-Agudelo and C. Narváez-Tovar, “Mechanical characterization of polylactic acid, polycaprolactone and Lay-Fomm 40 parts manufactured by fused deposition modeling, as a function of the printing parameters,” *ITECKNE*, vol. 16, no. 2, pp. 25–31, 2019.

[99] I. T. Garces and C. Ayranci, “A view into additive manufactured electro-active reinforced smart composite structures,” *Manuf. Lett.*, vol. 16, pp. 1–5, 2018.

[100] N. van de Werken, H. Tekinalp, P. Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams, and M. Tehrani, “Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective,” *Addit. Manuf.*, vol. 31, p. 100962, 2020. doi: 10.1177/0021998316646169