

Análisis del esfuerzo normal interlaminar en piezas elaboradas mediante manufactura aditiva

Andrea Carolina Paredes Saavedra

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera Mecánica

Director

Octavio Andrés González Estrada

Ingeniero Mecánico, PhD.

Codirectores

Juan Sebastián León Becerra

Ingeniero Mecánico, PhD.

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra

Ingeniero Mecánico, PhD.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A Dios por permitirme culminar este proyecto en mi vida y darme la fuerza, constancia y salud para cumplir los objetivos propuestos.

A mi madre Flor Elba quien con su apoyo incondicional y amor fue el faro que guio mi caminar durante todos estos años.

A mis hermanos Oscar y Nadia quienes día y noche fueron testigos del esfuerzo, quienes con sus bromas y chistes han alegrado siempre mi vida.

A mis sobrinos Juan Diego, Catalina, Samuel y Fabián, quienes fueron los motores silenciosos que me impulsaron a convertirme en un buen ejemplo para ellos.

A mis familiares por contribuir de una u otra forma con mi desarrollo como profesional pero más aún como persona.

Agradecimientos

A mi director de proyecto Andrés González, a mis codirectores Juan Sebastián León y Oscar Bohórquez, por su paciencia y colaboración en el desarrollo de este proyecto. Al semillero de investigación en manufactura aplicada, donde aprendí a investigar y gracias al cual tuve la oportunidad de participar en congresos de ingeniería mecánica, que aportaron considerablemente en mi formación como profesional.

Al SENA- Tecnoparque nodo Bucaramanga, por permitirme usar sus instalaciones y su impresora 3d, clave en la realización de este proyecto.

A mis amigos Camilo Cárdenas y Oscar Mantilla quienes se convirtieron en mis hermanos, con quienes las clases siempre fueron más amenas.

A los compañeros de carrera que siempre estuvieron pendientes, dispuestos a compartir su conocimiento y tiempo cuando lo necesité.

Contenido

Introducción.....	10
1. Objetivos.....	15
1.1.Objetivo general.....	15
1.2.Objetivos específicos.....	15
2. Metodología.....	16
2.1. Propiedades mecánicas de la matriz y de las fibras de refuerzo	16
2.2. Modelo de Lekhnitskii.....	18
2.3. Diseño del experimento.....	21
2.4. Modelo numérico.....	24
3. Resultados.....	26
3.1. Validación del modelo analítico y análisis de los resultados.....	26
3.2. Análisis del experimento factorial.....	32
4. Conclusiones.....	34
5. Recomendaciones.....	36
Referencias	37

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la matriz y de las fibras de refuerzo.....	17
Tabla 2. Variables independientes y niveles de tratamiento del diseño factorial.	22
Tabla 3. Configuración del laminado y fracción volumétrica de refuerzo.	24
Tabla 4. Esfuerzo normal interlaminar, modelo numérico y analítico.	27
Tabla 5. Esfuerzo normal intralaminar longitudinal.....	30
Tabla 6. Parámetros de impresión.	36

Lista de Figuras

Figura 1. Impresora MarkTwo antes (a) y durante (b) el proceso de impresión.....	18
Figura 2. Geometría del espécimen (a) y parámetros de montaje (b) para medir la resistencia de tensión interlaminar, según la norma ASTM D6415.....	19
Figura 3. Probeta reforzada con dos anillos de fibra de Carbono y densidad del relleno de 50 (a) 40 (b) y 30% (c).....	23
Figura 4. Condiciones de contorno. Vértice de la viga y soportes inferiores (a), Fuerzas distribuidas (b).....	25
Figura 5. Análisis de independencia de malla.....	26
Figura 6. Distribución del máximo esfuerzo normal interlaminar en probeta reforzada con cuatro anillos de fibra de carbono y relleno con densidad de 50%.	29
Figura 7. Desplazamiento vertical del vértice de todas las combinaciones analizadas. Fibra de vidrio con 2 (FV2) y 4 (FV4) anillos, Fibra de Carbono con 2 (FC2) y 4 (FC4) anillos y Kevlar con 2 (Kevlar 2) y 4 (Kevlar 4) anillos.....	31
Figura 8. Efectos principales para esfuerzo normal interlaminar.....	33
Figura 9. Interacción de los factores en el esfuerzo normal interlaminar.....	34

Nomenclatura

CBS: resistencia de la viga curva. Momento por unidad de ancho, generado por la fuerza, en la zona curva de la viga

d_x, d_y : distancia horizontal y vertical entre las dos barras de carga superior e inferior respectivamente.

D: diámetro de las barras de carga cilíndricas en el accesorio de flexión de cuatro puntos.

E_r, E_θ : módulos en las direcciones radial y tangencial, respectivamente.

g: parámetro usado en el cálculo del esfuerzo.

P: fuerza total aplicada al accesorio para la prueba de flexión de cuatro puntos.

r_i, r_o : radio interior y exterior del segmento curvo.

t: espesor de la probeta.

w: ancho de la probeta.

Δ : desplazamiento vertical del punto de aplicación de la fuerza durante la aplicación de la carga.

θ : ángulo que forma el brazo de la probeta con el eje horizontal en cualquier instante.

θ_i : ángulo que forma el brazo de la probeta con el eje horizontal, antes de empezar la aplicación de la fuerza.

σ_n : Esfuerzo normal en el segmento curvo.

Resumen

TÍTULO: ANÁLISIS DEL ESFUERZO NORMAL INTERLAMINAR EN PIEZAS ELABORADAS MEDIANTE MANUFACTURA ADITIVA. *

AUTOR: ANDREA CAROLINA PAREDES SAAVEDRA **

PALABRAS CLAVE: Modelado por deposición fundida, esfuerzo interlaminar, material compuesto, manufactura aditiva.

Descripción: La baja resistencia de tensión interlaminar en materiales compuestos fabricados mediante modelado por deposición fundida presenta serios retos en el diseño de estructuras con radios de curvatura pronunciados. Modelos numéricos y analíticos fueron desarrollados según la norma ASTM D6415, para determinar el esfuerzo normal interlaminar de un material compuesto, fabricado mediante manufactura aditiva, con refuerzo de fibra de vidrio, kevlar o carbono en matriz de nylon. Con el fin de determinar qué parámetros influyen significativamente en la falla del material, se realizaron cambios en el contenido de volumen de fibra, material de refuerzo y en la densidad de impresión del núcleo de la viga. Los resultados obtenidos muestran que la magnitud del esfuerzo normal interlaminar disminuye un poco más del 78% pasando de fibra de carbono a fibra de vidrio o kevlar como materiales de refuerzo. La densidad del relleno y la fracción volumétrica de refuerzo son factores que no afectan considerablemente el esfuerzo normal interlaminar.

* Trabajo de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Octavio Andrés González Estrada, PhD. Codirectores: Juan Sebastián León Becerra, PhD. Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra, Msc.

Abstract

Title: ANALYSIS OF THE INTERLAMINAR NORMAL STRESS IN PIECES MADE BY ADDITIVE MANUFACTURING. *

Author: ANDREA CAROLINA PAREDES SAAVEDRA. **

Key Words: Fused deposition modeling, Interlaminar stress, composite material, additive manufacturing.

Description: The low interlaminar tensile strength of fiber-reinforced composites materials produced by fused deposition modeling presents serious challenges in the design of structures with pronounced radii of curvature. Numerical and analytical models were performed according to ASTM D6415 standard to determine the normal stress in the interlaminar layer of a composite material produced by additive manufacturing, with fiberglass, kevlar, or carbon reinforcement in a nylon matrix. In order to determine which parameters significantly influence the failure of the material, changes were made in the fiber volume content, fiber reinforcement material, and in beam core print density. The results obtained show that the magnitude of the interlaminar normal stress decreases by up to 78%, going from carbon fiber to fiberglass or Kevlar as reinforcing materials. Infill density and fiber volume content are factors that do not significantly affect the interlaminar normal stress.

*Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Octavio Andrés González Estrada, PhD. Co-directors: Juan Sebastián León Becerra, PhD. Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra, Msc.

Introducción

Los materiales tienen tanta influencia en nuestras vidas que períodos históricos de la humanidad han sido dominados y nombrados en función de éstos (Barbero, 2011). En la actualidad el estudio y desarrollo de nuevos materiales es una necesidad ineludible, debido a los retos tecnológicos y ambientales que se presentan en la sociedad. Frente a estos retos se han generado soluciones entre las cuales se encuentran el cambio gradual de una fabricación sustractiva a una aditiva y el diseño de materiales compuestos, cuyas propiedades igualen o superan a las de sus constituyentes cuando actúan por separado. El objetivo de este estudio fue analizar el esfuerzo normal interlaminar de un material compuesto, elaborado con manufactura aditiva mediante los métodos analítico y numérico. Los procesos y conceptos necesarios para la introducción del tema son presentados a continuación.

El principio básico de la manufactura aditiva consiste en que un modelo, inicialmente generado utilizando un sistema tridimensional de diseño asistido por computadora (CAD), sea fabricado a través de una impresora, la cual forma la pieza a medida que agrega material por capas, a través de un extrusor que funde el material suministrado y lo deposita según la trayectoria descrita en el software. Cada capa es una sección transversal delgada de la parte derivada de los datos CAD, cuanto más delgada sea cada capa, más cerca estará la parte final de la original.

Otros procesos de fabricación como el sustractivo, requieren un análisis cuidadoso y detallado de la geometría de la pieza para determinar el orden en que se deben fabricar las diferentes características que la definen, las herramientas y procedimientos necesarios para lograr las dimensiones exactas. El desarrollo de la manufactura aditiva hace posible superar éstas y muchas otras limitaciones, además, supone una auténtica transformación respecto a los procesos de

fabricación tradicionales, al añadir material exclusivamente donde es necesario hasta lograr la pieza deseada.

El término manufactura aditiva enmarca en su definición siete categorías: fabricación por corte y laminado, estereolitografía, fusión por lecho de polvo, extrusión de material, chorro de material, inyección de aglutinante, y deposición directa de energía (Gibson & Rosen, 2015). El proceso utilizado en el desarrollo de esta investigación es el modelado por deposición fundida (MDF), el cual se encuentra dentro de la categoría de extrusión de material, esta técnica es atractiva debido a su bajo costo, bajo desperdicio de material y facilidad de uso (J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, 2017).

El MDF construye la pieza a través de la deposición sucesiva de capas de filamentos hechos de materiales termoplásticos como Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA), polipropileno (PP), polietileno (PE), poliamida (PA), policarbonato (PC), poliéter éter cetona (PEEK), polieterimida (PEI), polietersulfona (PES) y sulfuro de polifenileno (PPS) disponibles en el mercado (Yao, Jin, Rhee, Hui, & Park, 2018), sin embargo, este proceso de fabricación da lugar a estructuras internas porosas que propician la delaminación y conllevan a que los componentes obtenidos tengan propiedades mecánicas más bajas que los moldeados por inyección con el mismo material termoplástico (Melenka, Cheung, Schofield, Dawson, & Carey, 2016), estas limitaciones han obstaculizado la adopción de los componentes finales como un producto totalmente funcional, lo que conduce a que el prototipado sea su principal aplicación.

Se han realizado intentos para superar el bajo rendimiento mecánico de las piezas fabricadas con esta tecnología, mediante la adición de refuerzos con fibras o partículas de materiales con mejores propiedades, esto se ha utilizado en la industria de los polímeros para mejorar la resistencia estructural en los compuestos tradicionales, originando lo que se conoce como manufactura aditiva

reforzada con fibra (FRAM) por sus siglas en inglés (Ivanova, Williams, Engineering, Tech, & Campbell, 2013). Zhong et al, realizó un estudio donde partículas de fibra de vidrio fueron incorporadas al Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) con el objetivo de incrementar el esfuerzo de tensión en componentes fabricados con este material mediante MDF (Zhong, Li, Zhang, Song, & Li, 2001), la investigación demostró que el esfuerzo de adhesión interlaminar incrementaba a medida que lo hacía en contenido de fibra de vidrio, mientras la flexibilidad del componente disminuía considerablemente.

La variación de las propiedades mecánicas en piezas producidas por MDF tras la incorporación de partículas de fibra de carbono al ABS, fue investigada por Ning et al. obteniendo como resultado un aumento en la rigidez y en la resistencia a la tracción (Ning, Cong, Qiu, Wei, & Wang, 2015), se encontró que las muestras reforzadas en un rango de 0-5 wt % (porcentaje en peso) de fibra de carbono lograron un incremento del 27% en la resistencia a la tracción y un 14.3 % en la rigidez, curiosamente, en el rango de 5-10 wt % de refuerzo, la resistencia a la tracción desmejoró significativamente para aumentar luego que el 10 wt% de contenido de fibra de carbono fuera superado.

Pocas investigaciones en componentes fabricados mediante la técnica de FDM usando un material compuesto reforzado con fibra continua han sido realizadas, hasta la fecha solo dos métodos para introducir fibras continuas de refuerzo durante el proceso de impresión han sido considerados en la literatura: incrustación de la fibra continua directamente en el componente a través del método de doble extrusión (Melenka et al., 2016), (Dickson, Barry, McDonnell, & Dowling, 2017), (Justo, Távora, & París, 2018), (Klift, Koga, Todoroki, Ueda, & Hirano, 2016), o introducción de la fibra continua en el inyector llevando a cabo un proceso de coextrusión (Nakagawa, Mori, & Maeno, 2017), (Matsuzaki, Ueda, Namiki, Jeong, & Asahara, 2016),

(chuncheng Yang, Xiaoyong Tian, Tengfei Liu, Yi Cao, 2017), (Caminero, Chacón, García-moreno, & Reverte, 2018). Los estudios citados anteriormente han resaltado el impacto de diferentes parámetros del proceso de impresión tales como: el grosor de la capa, la fracción de volumen de refuerzo y la orientación de la fibra, en el comportamiento mecánico de la pieza bajo cargas de flexión y tracción.

Diferentes combinaciones de refuerzos con fibra continua y matriz termoplástica han sido realizadas: refuerzos de fibra de carbono, kevlar y vidrio han sido embebidos en matrices de nylon, PLA y ABS (Hofstätter, Pedersen, Tosello, & Hansen, 2017), (Parandoush & Lin, 2017), (Wang, Jiang, Zhou, Gou, & Hui, 2017), lo cual ha demostrado un aumento en la resistencia mecánica en comparación con los componentes impresos de termoplástico puro, el estudio del comportamiento de la unión entre las láminas del componente impreso tras ser sometido a cargas ha sido exiguo (chuncheng Yang, Xiaoyong Tian, Tengfei Liu, Yi Cao, 2017), (Li et al., 2016). La región interlaminar entre las capas de fibras de refuerzo y las de matriz, es altamente susceptible a la delaminación, la cual puede ser ocasionada por uno o varios de los siguientes factores: mal posicionamiento del material, incrustaciones de partículas no deseadas, generación de porosidades durante el proceso de impresión, matriz con pobres propiedades mecánicas o por un tipo específico de carga mecánica, que a menudo desemboca en una falla global del componente.

En esta investigación, el esfuerzo normal interlaminar de compuestos reforzados con fibra continua, mediante la técnica de FDM, se evaluó a través de la norma ASTM D6415 (ASTM International, 1999). El modelo de elementos finitos se desarrolló teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales que se emplean en la impresora MarkTwo de Markforged, usando fibra de carbono, fibra de vidrio y kevlar como refuerzo en matriz de nylon, para ello se modeló geoméricamente la pieza en el software ANSYS donde se realizó un estudio del

comportamiento mecánico de cada combinación, específicamente del esfuerzo normal interlaminar. Los parámetros particularmente evaluados fueron, el contenido de volumen de fibra y la densidad del relleno triangular utilizado. La validez las ecuaciones formuladas por Lekhnitskii fue verificada. Posteriormente se realizó una comparación de los datos calculados analíticamente con los obtenidos mediante el método de elementos finitos.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Realizar el análisis del esfuerzo de tensión interlaminar en piezas fabricadas con materiales compuestos, elaborados mediante manufactura aditiva.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar el esfuerzo normal interlaminar de materiales compuestos reforzados con fibra, producidos mediante manufactura aditiva, mediante el método de Lekhnitskii, empleando la norma ASTM D6415.
- Establecer la influencia de la fracción volumétrica de fibra y de la densidad del relleno de la probeta, en el esfuerzo normal interlaminar de materiales compuestos elaborados mediante manufactura aditiva, a través de un diseño de experimento.
- Comparar los resultados obtenidos mediante el método de Lekhnitskii con los producidos mediante el análisis de elementos finitos.

2. Metodología

La metodología aplicada en este trabajo se rige bajo la norma ASTM D6415 (ASTM International, 1999) y el modelo de placas anisotrópicas de Lekhnitskii (Lekhnitskii, 1968) para calcular el esfuerzo normal interlaminar de materiales compuestos reforzados unidireccionalmente. La validez del método se comprobó realizando análisis numéricos a diferentes materiales compuestos, a los cuales le fueron variados parámetros de su configuración con el fin de determinar mediante un diseño factorial, su influencia sobre el esfuerzo normal interlaminar.

2.1. Propiedades mecánicas de la matriz y de las fibras de refuerzo

Tres tipos de fibra sintética para reforzar nylon fueron seleccionados para modelar el esfuerzo interlaminar en vigas curvas elaboradas mediante manufactura aditiva, la primera es la fibra de vidrio, ampliamente utilizada por su bajo costo y su alto porcentaje de elongación previo a la rotura, seguida de las fibras de carbono y kevlar, las cuales tienen alta resistencia, elevada rigidez y baja densidad en comparación con la primera.

En el proceso de manufactura aditiva, los materiales proporcionados para realizar las impresiones están caracterizados por cada empresa. La compañía Markforged, a la cual pertenece la impresora MarkTwo utilizada como referente para la fabricación de las probetas, proporciona la hoja de datos que contiene las propiedades mecánicas de los materiales usados como matriz y como refuerzo (Markforged, 2018). El núcleo de la viga está constituido por nylon impreso en un arreglo de estructura triangular, al cual le fue variado su valor de densidad en 30, 40 y 50%. Este

tipo de relleno fue caracterizado analíticamente según las ecuaciones propuestas por Lorna Gibson (Lorna J. Gibson, 1997), donde las propiedades la matriz mostradas en la

Tabla 1 fueron tomadas como referencia.

Tabla 1.

Propiedades mecánicas de la matriz y de las fibras de refuerzo.

Propiedades	Nylon	Fibra de Vidrio	Fibra de Carbono	Kevlar
Módulo de Young [GPa]	0.94	21	60	27
Esfuerzo de Fluencia [MPa]	31	590	800	610
Elongación en la fractura (%)	260	3.8	1.5	2.7
Módulo de ruptura [MPa]	32	210	470	190
Módulo de flexión [GPa]	0.84	22	51	26
Coefficiente de poisson	0.39	0.21	0.1	0.36
Densidad [g/cm ³]	1.1	1.5	1.4	1.2

Se resalta que los filamentos proporcionados por Markforged consisten en una mezcla de fibras de refuerzo y resina, formando un material pre-impregnado, cuyo porcentaje real de fibra de refuerzo fue hallado por Justo et al (Justo et al., 2018), y se tiene en cuenta en el desarrollo de esta investigación.

La Figura 1 muestra la impresora MarkTwo de Markforged antes a) y durante b) el proceso de impresión de una probeta con la geometría descrita en la norma ASTM D6415 (ASTM International, 1999).

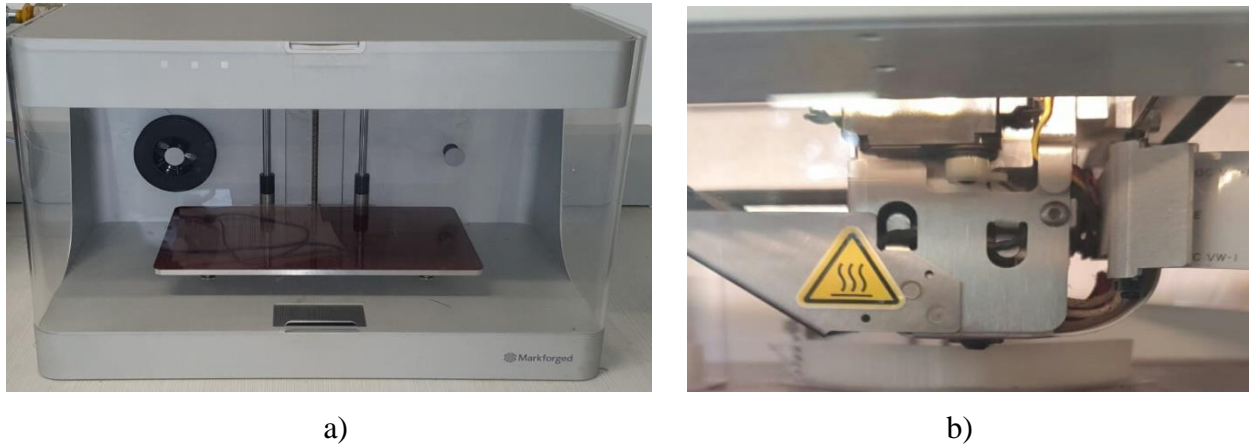


Figura 1. Impresora MarkTwo antes (a) y durante (b) el proceso de impresión

2.2. Modelo de Lekhnitskii.

Las ecuaciones presentadas a continuación permiten determinar el esfuerzo normal interlaminar, en una probeta curva, fabricada con material compuesto reforzado unidireccionalmente. La geometría del espécimen modelado y los parámetros del montaje en la prueba de flexión a cuatro puntos descrita se muestran en la Figura 2, donde son señaladas las principales características según lo recomendado en la norma ASTM D6415 (ASTM International, 1999). El valor numérico de los parámetros d_x , d_y y D fue tomado del trabajo realizado por A. C. Paredes et al (Paredes, Bohórquez, Pertuz, Rueda, & González-Estrada, 2019), donde se analizó el esfuerzo normal interlaminar, experimentalmente, según la norma ASTM D6415 (ASTM International, 1999).

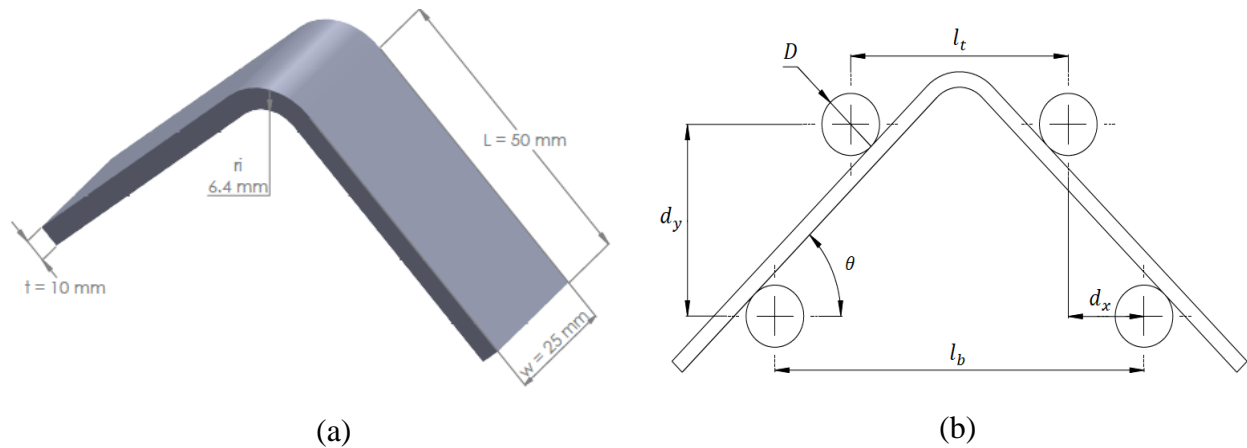


Figura 2. Geometría del espécimen (a) y parámetros de montaje (b) para medir la resistencia de tensión interlaminar, según la norma ASTM D6415.

Al someter este tipo de vigas a flexión pura, esfuerzos radiales y de corte son inducidos al interior de esta. Si la carga es lo suficientemente intensa puede generar delaminación de tipo abierto en el sitio donde se presenta el mayor esfuerzo radial. Dado que el máximo esfuerzo normal interlaminar ocurre en un punto en particular, este modelo ofrece una excelente oportunidad para estudiar el inicio y posterior crecimiento de la delaminación en un material compuesto laminado.

Para el cálculo de la resistencia de la viga curva o Curved Beam Strength (CBS) por sus siglas en inglés, se utilizó la ecuación (1).

$$CBS = \left(\frac{P}{2w \cos(\theta)} \right) \left(\frac{d_x}{\cos(\theta)} + (D + t) \tan(\theta) \right) \quad (1)$$

Donde P representa la carga, θ el ángulo en grados que forma el brazo de la probeta con el eje horizontal, d_x la distancia horizontal entre las líneas centrales de los dos rodillos adyacentes superior e inferior $(l_b - l_t)/2$, D el diámetro de los cilindros que aplican la carga y t el espesor de la probeta. El término CBS representa el momento por unidad de ancho, generado por la fuerza, en la zona curva de la viga. El ángulo θ es importante para calcular el valor del momento aplicado

en cualquier instante, sin embargo, es un parámetro que cambia constantemente durante la aplicación de la carga, su valor en un instante determinado está dado por las ecuaciones (2) y (3).

$$d_y = d_x \tan(\theta_i) + \frac{D + t}{\cos(\theta_i)} - \Delta \quad (2)$$

$$\theta = \text{sen}^{-1} \left(\frac{-d_x (D + t) + d_y \sqrt{d_x^2 + d_y^2 - D^2 - 2Dt}}{d_x^2 + d_y^2} \right) \quad (3)$$

Donde θ_i es el ángulo que forman los brazos de la probeta con el eje horizontal justo antes de empezar la prueba y Δ es el desplazamiento vertical del punto de aplicación de la fuerza durante la aplicación de la carga.

Para el cálculo del esfuerzo normal interlaminar se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Lekhnitskii en su estudio para las tensiones en un segmento de viga curva con anisotropía (Lekhnitskii, 1968). El esfuerzo normal σ_n está dado por las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_n = -\frac{CBS}{r_o^2 g} \left[1 - \frac{1 - \rho^{k+1}}{1 - \rho^{2k}} \left(\frac{r_m}{r_o} \right)^{k-1} - \frac{1 - \rho^{k-1}}{1 - \rho^{2k}} \rho^{k+1} \left(\frac{r_o}{r_m} \right)^{k+1} \right] \quad (4)$$

$$g = \frac{1 - \rho^2}{2} - \frac{k}{k+1} \frac{(1 - \rho^{k+1})^2}{1 - \rho^{2k}} + \frac{k\rho^2}{k-1} \frac{(1 - \rho^{k+1})^2}{1 - \rho^{2k}} \quad (5)$$

$$k = \sqrt{\frac{E_\theta}{E_r}}, \quad \rho = \frac{r_i}{r_o} \quad (6)$$

Donde r_o y r_i representan el radio interno y externo de la sección curva de la viga, respectivamente. Los parámetros g , ρ y k relacionan las variables anteriormente descritas.

2.3. Diseño del experimento.

Se desconoce exactamente qué factores influyen de manera significativa en el esfuerzo normal interlaminar de materiales compuestos producidos mediante manufactura aditiva. Para determinar el grado de influencia que tienen algunos parámetros en el esfuerzo normal interlaminar, se realizó un experimento variando el material de la fibra de refuerzo, la densidad del relleno de impresión y el contenido de volumen de fibra (representado en el número de anillos) de una viga curva. El diseño del experimento se presenta a continuación.

- **Establecimiento del problema objeto de estudio.**

El objetivo del estudio fue determinar la influencia del material de la fibra de refuerzo, densidad del relleno de impresión y fracción volumétrica de fibra, en el esfuerzo normal interlaminar de materiales compuestos producidos mediante manufactura aditiva.

- **Selección de variables independientes y número de tratamientos a variar.**

Las variables independientes son tres: material de refuerzo, densidad del relleno de la probeta y contenido de volumen de fibra (representado en el número de anillos). Estos factores y sus correspondientes niveles o tratamientos se presentan en la

Tabla 2. La aplicación de los tratamientos es aleatoria.

Tabla 2.

Variables independientes y niveles de tratamiento del diseño factorial.

Factores	Niveles
Contenido de volumen de fibra de refuerzo (A)	2 anillos (10.58 cm ³)
	4 anillos (20.44 cm ³)
Material de refuerzo (B)	Fibra de Carbono
	Fibra de Vidrio
	Kevlar
Densidad de relleno (C)	50%
	40%
	30%

Cada probeta fue modelada en el software Eiger de Markforged, donde se configuraron los parámetros de impresión, con el fin de obtener con precisión el valor del contenido de fibra de refuerzo mostrado en la tabla anterior. La Figura 3 muestra una probeta reforzada con dos anillos concéntricos de fibra de Carbono y diferentes valores de densidad de relleno.

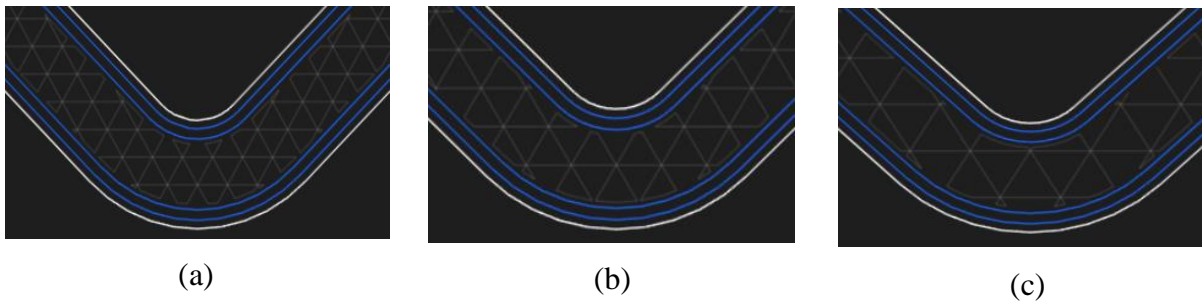


Figura 3. Probeta reforzada con dos anillos de fibra de Carbono y densidad del relleno de 50
(a) 40 (b) y 30% (c).

- **Selección de variables dependientes.**

La variable dependiente, la cual es objeto de medición, es el esfuerzo normal interlaminar.

- **Selección del diseño experimental que se ajusta al problema o caso.**

El tipo de experimento que se ajusta a este caso es el factorial. Los experimentos factoriales son la única forma de descubrir interacciones entre variables. Las hipótesis nulas para el experimento planteado con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ son:

H1: No hay diferencia entre los resultados de los 2 niveles del factor A.

H2: No hay diferencia entre los resultados de los 3 niveles del factor B.

H3: No hay diferencia entre los resultados de los 3 niveles del factor C.

H4: No hay interacción entre los factores A y B.

H5: No hay interacción entre los factores A y C.

H6: No hay interacción entre los factores B y C.

- **Ejecución del experimento**

El análisis factorial se realizó con ayuda del programa para análisis estadísticos Minitab, a partir de los resultados obtenidos del análisis numérico de cada una de las 18

combinaciones posibles. Los resultados del análisis numérico y del diseño factorial se presentan en la sección 3.

2.4. Modelo numérico.

Con el objetivo de calcular el valor del esfuerzo normal interlaminar de materiales compuestos laminados, se modeló la geometría mostrada en la Figura 1, utilizando el módulo Ansys Composite PrepPost (ACP) de Ansys Workbench, donde se crearon las diferentes capas, hasta lograr el espesor de 10 mm. La distribución de las capas y la fracción volumétrica de refuerzo de cada configuración se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3.

Configuración del laminado y fracción volumétrica de refuerzo.

Laminado	Fracción volumétrica de refuerzo
$[0_2, N_1, 0_2]$	0.5
$[0_4, N_1, 0_4]$	0.75

El método de elementos finitos requiere la definición adecuada de las condiciones de contorno y de los parámetros de mallado para la convergencia óptima de la solución. Para la viga objeto de estudio, las condiciones de contorno corresponden a las cargas distribuidas aplicadas en la parte superior y a los soportes inferiores que representan los rodillos de la máquina de prueba. Adicionalmente el vértice de la viga, señalado con la letra A en la Figura 4 (a) fue restringido a desplazarse solamente en dirección vertical.

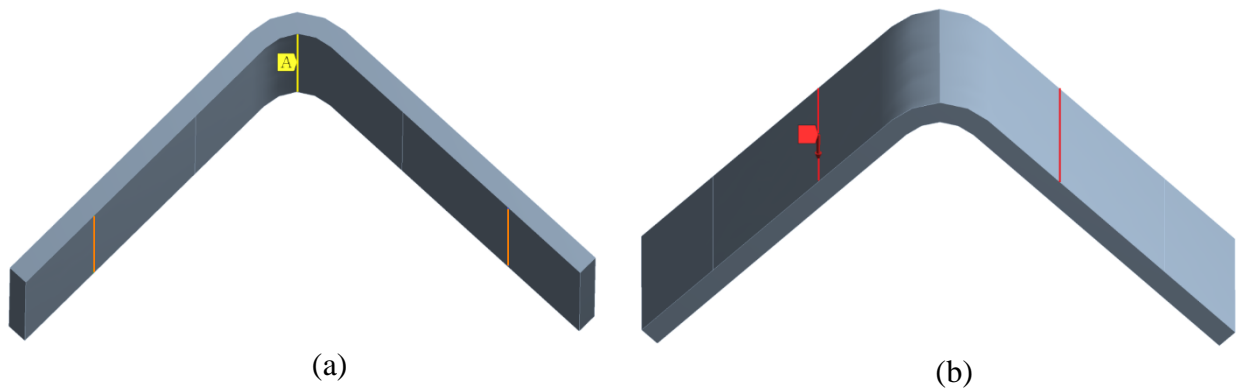


Figura 4. Condiciones de contorno. Vértice de la viga y soportes inferiores (a), Fuerzas distribuidas (b).

Con el objetivo de obtener resultados precisos fue necesario controlar la calidad de mallado, específicamente del tamaño de elemento y de algunos factores como la ortogonalidad y la oblicuidad. En el proceso de discretización implementado, los valores de ortogonalidad se encuentran en el rango de 0,9 y 1, mientras los de oblicuidad entre 0,032 y 0. Para la elección del tamaño del elemento de la malla, se realizó un análisis de independencia del esfuerzo respecto al número de elementos. La Figura 5 presenta la gráfica que relaciona el esfuerzo normal interlaminar con el número de elementos utilizados en el análisis numérico, donde se evidencia que a partir de los 150.000 elementos el resultado se estabiliza, por lo tanto, las simulaciones de los diferentes compuestos fueron realizadas con un mallado tipo estructurado con elementos cuadrados de 0.58135 mm de lado. Conviene señalar, que el número de elementos mostrados en la gráfica corresponde a la suma de los elementos de cada capa del material compuesto.

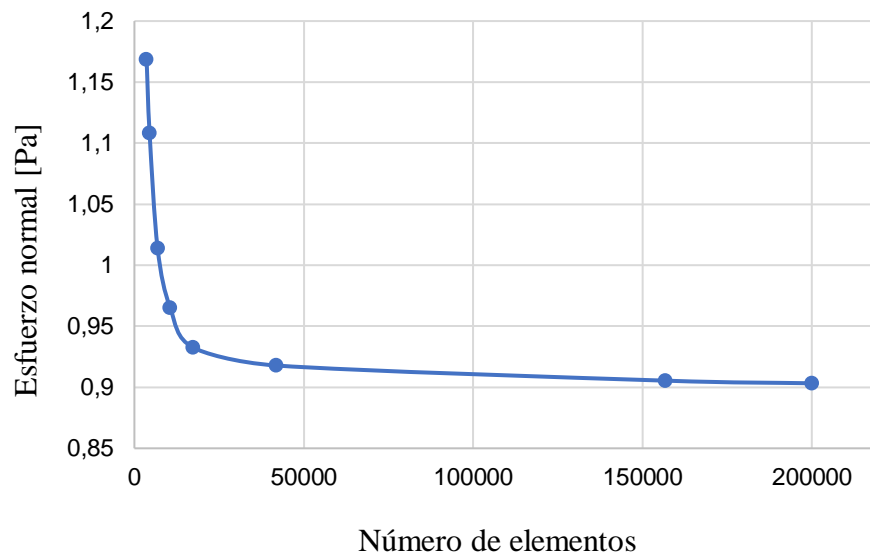


Figura 5. Análisis de independencia de malla.

3. Resultados

Los resultados muestran la influencia de cada uno de los tres factores analizados en el esfuerzo normal interlaminar. Se comparan los resultados del modelo analítico de Lekhnitskii (Lekhnitskii, 1968) con el modelo numérico propuesto. Se analizan los esfuerzos presentes en el plano que contiene las fibras de refuerzo y se comparan respecto al esfuerzo normal interlaminar obtenido. Finalmente, se obtiene el desplazamiento vertical representativo de cada combinación.

3.1. Validación del modelo analítico y análisis de los resultados.

El ensayo de flexión a cuatro puntos fue realizado según la norma ASTM D6415 (ASTM International, 1999) a cada una de las 18 combinaciones posibles. Se aplicó una fuerza de 100 N, con el objetivo de comparar el esfuerzo normal interlaminar generado en cada combinación bajo esta condición de carga, asegurando el régimen lineal elástico al no generar grandes deformaciones. Teniendo en cuenta los parámetros utilizados en el desarrollo de análisis numérico, se calculó el esfuerzo normal interlaminar aplicando el modelo de Lekhnitskii (Lekhnitskii, 1968).

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los modelos numérico y analítico para las 18 combinaciones posibles. Se puede observar, que el modelo analítico predice con un margen de error menor al 2% los resultados de esfuerzo normal interlaminar obtenidos mediante el análisis numérico, lo cual demuestra que es un modelo válido para calcular los esfuerzos interlaminares en probetas de material compuesto fabricado mediante manufactura aditiva, con un núcleo celular de patrón triangular.

Tabla 4.

Esfuerzo normal interlaminar, modelo numérico y analítico.

Densidad del relleno 30%						
Material	4 anillos			2 anillos		
	FEM (MPa)	Lekhnitskii (MPa)	%	FEM (MPa)	Lekhnitskii (MPa)	%
Fibra de Carbono	0.90327	1.02	1.14	0.86508	0.8747	1.10
Fibra de vidrio	0.21437	0.2169	1.33	0.19019	0.1925	1.19
Kevlar	0.22346	0.2266	1.38	0.18296	0.1858	1.51

Densidad del relleno 40%						
Material	4 anillos			2 anillos		
	FEM	Lekhnitskii	%	FEM	Lekhnitskii	%
	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	
Fibra de Carbono	0.90152	0.9165	1.63	0.8619	0.871	1.04
Fibra de vidrio	0.20752	0.2104	1.36	0.1878	0.1907	1.52
Kevlar	0.21588	0.2184	1.15	0.1807	0.1838	1.68

Densidad del relleno 50%						
Material	4 anillos			2 anillos		
	FEM	Lekhnitskii	%	FEM	Lekhnitskii	%
	(MPa)	(MPa)		(MPa)	(MPa)	
Fibra de Carbono	0.90018	0.9095	1.02	0.8596	0.8702	1.21
Fibra de vidrio	0.20821	0.2116	1.60	0.1860	0.1889	1.53
Kevlar	0.209	0.2115	1.18	0.178	0.181	1.65

Así mismo, los resultados presentados en la Tabla 4 muestran que el aumento en la densidad del relleno y la disminución de contenido de fibra de refuerzo, reducen el esfuerzo normal interlaminar, mejorando el comportamiento del material frente a la delaminación, esta situación es similar para los tres tipos de materiales analizados. Sin embargo, el efecto de esos dos factores no es tan significativo como el producido por el material de la fibra de refuerzo. La magnitud del esfuerzo normal disminuye un poco más del 75 % pasando de fibra de carbono a fibra de vidrio o a Kevlar como materiales de refuerzo, por otro lado, la variación máxima alcanzada modificando la densidad de relleno y el contenido de fibra es menor al 10%, esto se evidencia con más detalle en el análisis del diseño factorial presentado en la sección 3.2.

La Figura 6 muestra la ubicación y distribución del máximo esfuerzo normal interlaminar generado a partir del ensayo de flexión a cuatro puntos, en la probeta reforzada con cuatro anillos de fibra de carbono y relleno con densidad de 50%. Como se puede observar, el máximo esfuerzo normal se ubica en la zona curva de la viga, justo en la interfaz de cambio de material. La variación del valor de esfuerzo a lo largo de la sección transversal no es significativa, lo cual se evidencia en el color rojo a lo largo del plano de sección trazado. Se puede observar que la zona sometida a tensión es la que experimenta el mayor esfuerzo normal, por lo tanto, debe prestarse especial atención a la influencia del contenido de refuerzo en esa zona. La misma distribución de tensiones observada en las Figura 6 se replica para los otros materiales de refuerzo.

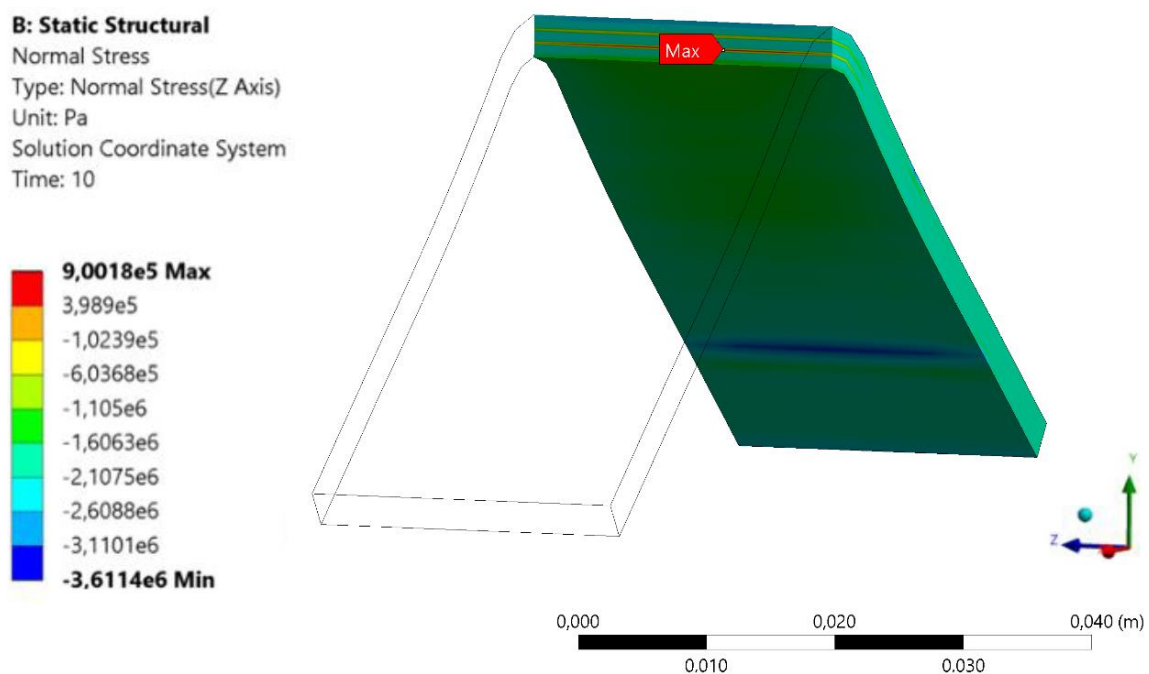


Figura 6. Distribución del máximo esfuerzo normal interlaminar en probeta reforzada con cuatro anillos de fibra de carbono y relleno con densidad de 50%.

El estado de esfuerzos en una viga curva sometida a un ensayo de flexión a cuatro puntos es complejo. Esfuerzos de tensión se generan en la superficie inferior, y de compresión en la superficie superior. El esfuerzo de tensión radial varía desde cero en las superficies superiores e inferiores, hasta un pico en aproximadamente un tercio del espesor del espécimen (ASTM International, 1999).

Las estructuras laminadas fabricadas con materiales compuestos reforzados unidireccionalmente están diseñadas de manera que las fibras transporten las cargas en las orientaciones deseadas en el plano, sin embargo, la resistencia normal interlaminar, asociada al esfuerzo normal interlaminar mostrado en la Tabla 4 es particularmente interesante debido a que puede llegar a ser el dos veces menor que la resistencia en el plano del laminado mostrada en la Tabla 5, lo cual confirma que esta última juega un papel fundamental en la falla por delaminación.

Tabla 5.

Esfuerzo normal interlaminar longitudinal.

Esfuerzo normal interlaminar en dirección longitudinal en MPa						
Material	Densidad 30%		Densidad 40 %		Densidad 50%	
	4 anillos	2 anillos	4 anillos	2 anillos	4 anillos	2 anillos
Fibra de Carbono	2.75	3.61	2.78	3.57	2.79	3.63
Fibra de Vidrio	2.21	2.59	2.065	2.69	2.01	2.76
Kevlar	2.40	2.83	2.26	2.95	2.16	3.02

La Figura 7 muestra la influencia de la densidad del relleno en el desplazamiento vertical del vértice de la viga. Los materiales reforzados con cuatro y dos anillos están representados con líneas continuas y discontinuas respectivamente. Como era de esperarse, el incremento de 30 a 50% en la densidad del relleno disminuye el desplazamiento vertical del vértice hasta un 9%, esto se debe a una disminución del espacio vacío en el relleno, traduciéndose en un aumento de rigidez, esta última propiedad aumenta considerablemente en los materiales reforzados con 4 anillos provocando una disminución de 35.6% en el desplazamiento del vértice, frente a los reforzados con 2 anillos.

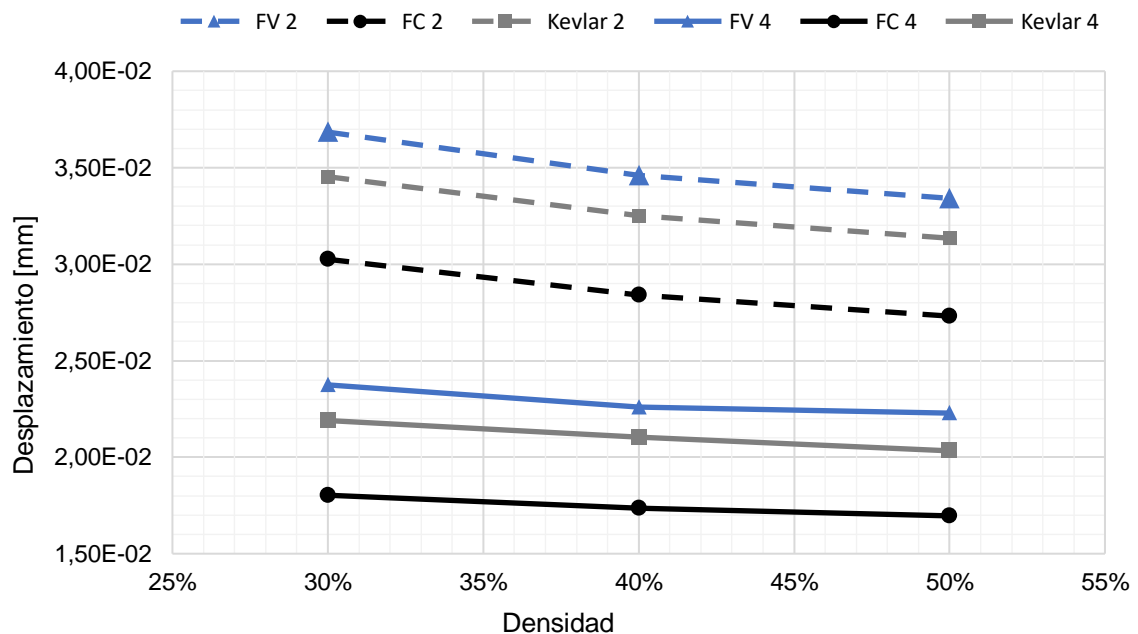


Figura 7. Desplazamiento vertical del vértice de todas las combinaciones analizadas. Fibra de vidrio con 2 (FV2) y 4 (FV4) anillos, Fibra de Carbono con 2 (FC2) y 4 (FC4) anillos y Kevlar con 2 (Kevlar 2) y 4 (Kevlar 4) anillos.

En el proceso de manufactura aditiva, existen diversos factores que influyen en las propiedades mecánicas de la pieza final. La temperatura de impresión afecta el proceso de fusión y solidificación, si es muy elevada puede crear grandes poros y gases del exterior podrían entrar, si es muy baja, se dificulta la consolidación de la pieza, pero los esfuerzos térmicos serán más reducidos (León B., Díaz-Rodríguez, & González-Estrada, 2020). Los modelos analítico y numérico utilizados en esta investigación no tienen en consideración muchos factores inherentes a la manufactura aditiva, motivo por el cual análisis experimentales son necesarios.

3.2. Análisis del experimento factorial.

El estudio factorial de tres factores (A, B y C) permitió investigar los efectos: A, B, C, AB, AC y BC, en el esfuerzo normal interlaminar. Las Figura 8 y 9 presentan los efectos principales y de interacción de la densidad, el material y el número de anillos en el esfuerzo normal.

La Figura 8 muestra que hay variación en los resultados de los niveles de cada factor, lo que descarta las hipótesis nulas planteadas. La densidad del relleno de la probeta es el factor menos influyente, su aumento de 30 a 50% disminuye solo en 1.4% el esfuerzo normal, le sigue la fracción volumétrica de refuerzo que al pasar de 0.75 a 0.5 lo disminuye en 8.2 %, finalmente la fibra de carbono demostró ser el material que más efecto tiene, debido a que aumenta el esfuerzo normal en 78.11% respecto al kevlar, la diferencia de la influencia de éste último respecto a la fibra de vidrio es del 3.02 %.

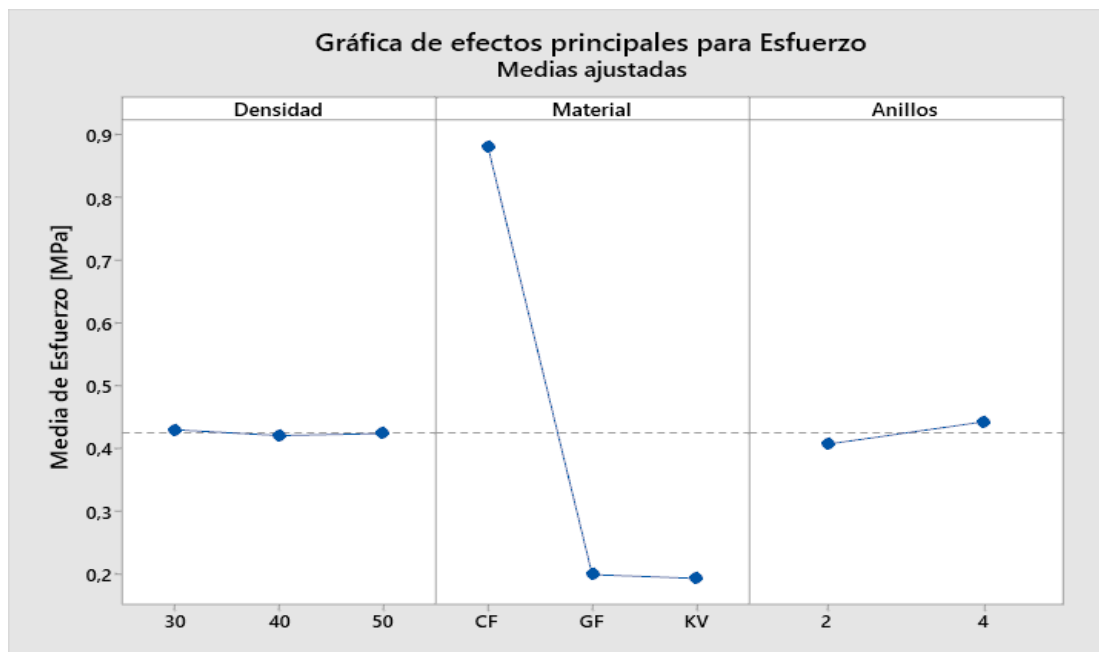


Figura 8. Efectos principales para esfuerzo normal interlaminar.

La Figura 9 muestra la interacción de los diferentes factores en el esfuerzo normal interlaminar. Puede observarse que el efecto de la densidad del relleno de la probeta y el material de refuerzo no es significativo, exceptuando por la fibra de carbono, por otro lado, la influencia del contenido de refuerzo es considerable y puede modificarse independientemente del refuerzo que se elija, por lo tanto, es el factor que debe considerarse variar como primera opción a la hora de tener un material de refuerzo fijo, y querer disminuir el esfuerzo normal interlaminar.

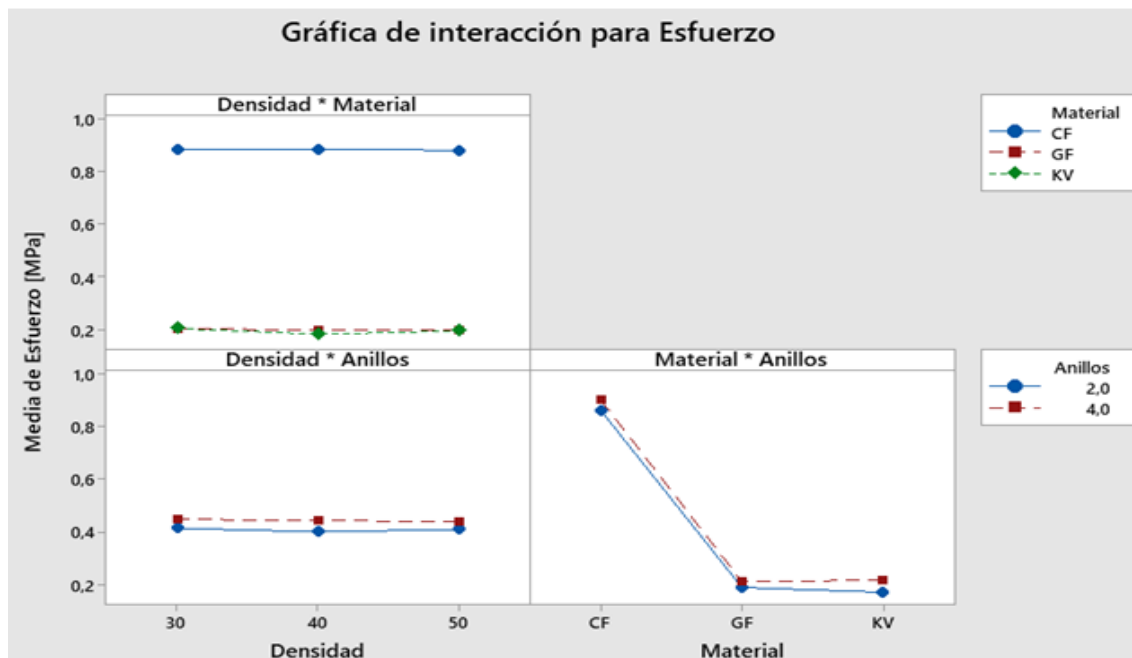


Figura 9. Interacción de los factores en el esfuerzo normal interlaminar.

4. Conclusiones

Se realizó el cálculo analítico y numérico del esfuerzo normal interlaminar, de piezas elaboradas mediante manufactura aditiva, según los lineamientos de la norma ASTM D6415 (ASTM International, 1999). Un diseño factorial determinó la influencia del contenido de volumen de fibra, material de refuerzo y densidad del relleno de impresión en el esfuerzo normal interlaminar.

Los resultados del esfuerzo normal interlaminar, determinados a través del modelo numérico propuesto, difieren en menos del 2% de los calculados con el modelo analítico de Lekhnitskii (Lekhnitskii, 1968), lo cual demuestra la capacidad de la formulación de Lekhnitskii, para predecir con un margen de error aceptable el comportamiento del esfuerzo normal interlaminar, en vigas curvas reforzadas unidireccionalmente y fabricadas mediante manufactura aditiva. Sin embargo, es necesario confirmar experimentalmente los resultados, debido a la omisión de factores

inherentes a este tipo de manufactura, principalmente, los espacios vacíos en el núcleo de la probeta.

Se comprobó que los esfuerzos de tensión en la superficie inferior de la viga son superiores a los de compresión en la superficie superior, en consecuencia, el máximo esfuerzo normal interlaminar se ubica en la interfaz de cambio de material en la zona curva sometida a tensión. El análisis del experimento factorial permitió determinar que la densidad del relleno de la probeta es el factor menos influyente, su aumento de 30 a 50% disminuye solo en 1.4% el esfuerzo normal interlaminar. Al variar la fracción volumétrica de refuerzo de 0.75 a 0.5 se observó una disminución de 8.2 % en el esfuerzo normal interlaminar. Finalmente, el tipo de refuerzo, específicamente la fibra de carbono demostró ser el factor de mayor efecto, debido a que los materiales reforzados con este tipo de fibra presentaron un aumento en el esfuerzo normal interlaminar, de 78.11% respecto a los reforzados con Kevlar, la diferencia de la influencia de éste último respecto a la Fibra de vidrio es del 3.02 %, lo que permite concluir, que la rigidez del material utilizado como refuerzo es un factor determinante en la delaminación de materiales compuestos, fabricados mediante manufactura aditiva, específicamente en aquellos con pronunciados radios de curvatura.

La técnica de modelado por deposición fundida es una tecnología prometedora con gran potencial de desarrollo, sin embargo, la escasez de estudios que permitan superar las limitaciones mecánicas que presentan las piezas elaboradas con esta tecnología, revela la necesidad de continuar investigando la influencia de diversos factores, para poder mejorar el comportamiento mecánico y así pasar de ser una tecnología usada principalmente para prototipado a ser una tecnología de escala industrial, capaz de producir piezas funcionales.

5. Recomendaciones

Investigaciones adicionales deben ser desarrolladas, para determinar si la influencia del número de capas de refuerzo en la zona sometida a tensión en la viga es significativa en la magnitud del esfuerzo normal interlaminar. Para complementar la investigación, es necesario realizar pruebas experimentales que validen los resultados de los modelos anteriormente expuestos, para ello se sugieren los parámetros de impresión presentados en la Tabla 6, los cuales corresponden a los utilizados en el análisis numérico.

Tabla 6.

Parámetros de impresión.

Altura de capa [mm]	0.1
Patrón de relleno	Triangular
Densidad del relleno	30, 40 o 50%
Número de Capas de Pared	1
Número de capas inferiores y superiores	1
Tipo de relleno de fibra	Anillos concéntricos
Número de anillos	2 o 4

Referencias

- ASTM International, 1999. *D6415 - Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite*.
- Barbero, E. J. (2011). *Introduction to composite materials design* (2nd ed.). Retrieved from <https://b-ok.cc/book/2533523/417910>
- Caminero, M. A., Chacón, J. M., García-moreno, I., & Reverte, J. M. (2018). Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Polymer Testing*, 68, 415–423. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.038>
- chuncheng Yang, Xiaoyong Tian, Tengfei Liu, Yi Cao, D. L. (2017). 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites : mechanism and performance. *Rapid Prototyping*, 23, 209–215. <https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0098>
- Dickson, A. N., Barry, J. N., McDonnell, K. A., & Dowling, D. P. (2017). Fabrication of continuous carbon , glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 16, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.004>
- Gibson, I., & Rosen, D. (2015). *Additive Manufacturing Technologies* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Hofstätter, T., Pedersen, D. B., Tosello, G., & Hansen, H. N. (2017). State-of-the-art of fiber-reinforced polymers in additive manufacturing technologies. *Reinforced Plastics and Composites*, 36, 1061–1073. <https://doi.org/10.1177/0731684417695648>
- Ivanova, O., Williams, C., Engineering, M., Tech, V., & Campbell, T. (2013). Additive manufacturing (AM) and nanotechnology : promises and challenges. *Rapid Prototyping*, 19,

353–364. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2011-0127>

J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P. J. N. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: effect of process parameter on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*, 124, 143–157. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>

Justo, J., Távara, L., & París, F. (2018). Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites. *Composite Structures*, 185, 537–548. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.052>

Klift, F. Van Der, Koga, Y., Todoroki, A., Ueda, M., & Hirano, Y. (2016). 3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced ThermoPlastic (CFRTP) Tensile Test Specimens. *Open Journal of Composite Materials*, 6, 18–27. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.4236/ojcm.2016.61003>

Lekhnitskii, S. G. (1968). *Anisotropic Plates*. New York: Gordon and Breach.

León B., J., Díaz-Rodríguez, J. G., & González-Estrada, O. A. (2020). Daño en partes de manufactura aditiva reforzadas por fibras continuas. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 161–175. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020018>

Li, Z., Haigh, A., Soutis, C., Gibson, A., Sloan, R., & Karimian, N. (2016). Detection and evaluation of damage in aircraft composites using electromagnetically coupled inductors. *Composite Structures*, 140, 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.054>

Lorna J. Gibson, M. F. A. (1997). *Cellular Solids Structure and Properties* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>

Markforged. (2018). Material datasheet. Retrieved from https://static.markforged.com/markforged_composites_datasheet.pdf

- Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., Jeong, T., & Asahara, H. (2016). Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific Reports*, *6*, 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep23058>
- Melenka, G. W., Cheung, B. K. O., Schofield, J. S., Dawson, M. R., & Carey, J. P. (2016). Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. *Composite Structures*, *153*, 866–875. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>
- Nakagawa, Y., Mori, K., & Maeno, T. (2017). 3D printing of carbon fibre-reinforced plastic parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *91*, 7–13. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9891-7>
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, *80*, 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- 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>
- Paredes, A. C., Bohórquez, O., Pertuz, A., Rueda, Y., & González-Estrada, O. A. (2019). Interlaminar tensile strength for composite materials made by additive manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*, *1386*(1), 11–13. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1386/1/012002>
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, *110*, 442–458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>

- Yao, S., Jin, F., Rhee, K. Y., Hui, D., & Park, S. (2018). Recent advances in carbon-fiber-reinforced thermoplastic composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, *142*, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.007>
- Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L., & Li, Z. (2001). Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. *Materials Science and Engineering: A*, *301*, 125–130. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01810-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01810-4)