

**Estudio de propiedades mecánicas a compresión en materiales compuestos de matriz rígida  
reforzada**

**Cristian Alejandro Ruiz Florián**

**Juan David Argüello Bastos**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**Alberto David Pertuz Comas**

**Ingeniero Mecánico, MSc, PhD**

**Co-director**

**Octavio Andrés González Estrada**

**Ingeniero mecánico, MSc, PhD**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Mecánica**

**Bucaramanga**

**2018**

**DEDICATORIA**

A Dios, por ser siempre el guía y acompañante a lo largo de este camino, siendo él, quien marca el tiempo correcto de la realización de cada una de mis metas.

A mis padres, Lida Constanza y Roberto quienes con sus enseñanzas, regaños, consejos y apoyo incondicional, llevaron a que este sueño se volviera una realidad, siendo este un logro más familiar que personal. A mi hermano Daniel Mauricio quien ha sido una compañía durante estos años y quien entenderá con este logro que tarde o temprano los propósitos se pueden lograr. A mis abuelos Rosa Dora, Ismael y Manuel, que durante toda su vida me han llenado de sabiduría y aún puedo disfrutar de su compañía.

A mis amigos que estuvieron desde antes de iniciar este proceso, que siempre me apoyaron y confiaron que podría cumplir con la meta, también a los compañeros, colegas y amigos que a lo largo de este camino se convirtieron en personas importantes, quienes aportaron en gran manera a la formación recibida.

***CRISTIAN ALEJANDRO RUIZ F.***

*Dedicatoria*

*A mis padres, por su infinito amor y bondad; ellos, quienes han sido siempre mis pilares fundamentales a lo largo de este camino, esto se lo debo a ustedes.*

*A mi familia, quienes todo el tiempo me brindaron su apoyo, mi fuente de felicidad y de buscar ser cada vez una mejor persona.*

*A mis amigos, por compartir buenos y malos momentos; ustedes saben quiénes son.*

*Todo este trabajo ha sido posible gracias a ustedes.*

*Juan David Argüello Bastos*

### **Agradecimientos**

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto, especialmente a nuestro director Alberto David Pertuz Comas, quien con su conocimiento y orientación profesional, fue nuestro guía a lo largo del trabajo realizado.

Especial gratitud a la Escuela de ingeniería mecánica, que con sus laboratorios de impresión 3D y de ensayos mecánicos, fueron de vital ayuda para nuestro proceso de formación profesional y culminación del proyecto elaborado.

Además, un reconocimiento al Tecnoparque nodo Manizales, por la disposición para la fabricación de la mordaza y al Laboratorio de Microscopía ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará que nos abrió sus puertas para realizar un análisis más detallado en esta investigación.

## Contenido

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Introducción .....                                 | 14          |
| 1. Descripción del proyecto .....                  | 19          |
| 1.1 Planteamiento del problema.....                | 19          |
| 1.2 Justificación para solucionar el problema..... | 20          |
| 2. Objetivos .....                                 | 22          |
| 2.1 Objetivo General .....                         | 22          |
| 2.2 Objetivos Específicos.....                     | 22          |
| 3. Metodología .....                               | 24          |
| 3.1 Patrón de llenado.....                         | 26          |
| 3.2 Angulo de la fibra. ....                       | 27          |
| 3.3 Cantidad de capas de refuerzo. ....            | 28          |
| 3.4 Tipo de material .....                         | 29          |
| 4. Resultados y su análisis. ....                  | 31          |
| 5. Conclusiones .....                              | 47          |
| 6. Recomendaciones .....                           | 48          |
| Referencias bibliográficas.....                    | 49          |

## Lista de figuras

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <i>Figura 1.</i> Diseño de la mordaza tipo IITRI. ....   | 24          |
| <i>Figura 2.</i> Geometría de las probetas para ensayos de compresión. ....  | 25          |
| <i>Figura 4.</i> Montaje para el ensayo de compresión según ASTM D3410. ....   | 30          |
| <i>Figura 5.</i> Codificación de probetas según el tipo de falla presentado. ....  | 33          |
| <i>Figura 6.</i> Gráfica $\sigma$ vs $\varepsilon$ para los diferentes ángulos analizados a 12 Capas de refuerzo. ....   | 34          |
| <i>Figura 7.</i> Gráfica $\sigma$ vs $\varepsilon$ para para fibra de vidrio a 30 grados variando la cantidad de capas de refuerzo. ....   | 35          |
| <i>Figura 8.</i> a) Ruptura de fibras al extremo de la probeta. b) Sección de ensayo aceptable para que ocurra la falla. c) Método de impresión de las probetas a 0 grados. .... | 36          |
| <i>Figura 9.</i> Gráfica $\sigma$ vs $\varepsilon$ donde se muestran los cambios en la pendiente debido a ruptura temprana de fibras. ....                                       | 37          |
| <i>Figura 10.</i> Gráfica $\sigma$ vs $\varepsilon$ donde se varían los materiales de refuerzo, manteniendo 12 capas y 0°. ....  | 38          |
| <i>Figura 11.</i> Valores promedio del esfuerzo máximo a compresión de los ensayos realizados. ....  | 39          |
| <i>Figura 12.</i> Valores promedio del Módulo de elasticidad calculado para los ensayos realizados. ....   | 40          |
| <i>Costos de impresión de las probetas.</i> ....   | 41          |

---

|   |    |
|---|----|
| <i>Figura 13.</i> Sección transversal de la probeta de Fibra de Carbono en la zona de falla. ....   | 42 |
| <i>Figura 14.</i> Fibras de Carbono fracturadas .....   | 43 |
| <i>Figura 15.</i> A. Vista superior de la fractura a compresión de fibras orientadas a 30 grados. B. Fractura de modo Brooming. C. Fractura de modo Kink-band. .... | 44 |
| <i>Figura 16.</i> Múltiples fracturas en las fibras de vidrio dislocadas hacia diferentes direcciones. ..   | 45 |
| <i>Figura 17.</i> a) Filamentos de fibra de carbono fracturados y desorientados. b) Trozo de un filamento de fibra de carbono sujetado por la matriz de nylon.....  | 46 |

## Lista de tablas

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. <i>Parámetros de impresión para las probetas</i> .....                                  | 26          |
| Tabla 2. <i>Parámetros para establecer el mejor patrón de llenado</i> .....                      | 27          |
| Tabla 3. <i>Parámetros para analizar los ángulos de refuerzo</i> .....                           | 28          |
| Tabla 4. <i>Parámetros para analizar la influencia de la cantidad de capas de refuerzo</i> ..... | 28          |
| Tabla 5. <i>Parámetros para analizar los diferentes materiales de refuerzo</i> .....             | 29          |
| Tabla 6. <i>Valores del Esfuerzo máximo para diferentes cuellos de la probeta</i> .....          | 32          |
| Tabla 7. <i>Valores del Esfuerzo máximo para diferentes patrones de la matriz</i> .....          | 32          |

## Resumen

**Título:** Estudio de propiedades mecánicas a compresión en materiales compuestos de matriz rígida reforzada\*.

**Autores:** Cristian Alejandro Ruiz Florián, Juan David Argüello Bastos\*\*.

**Palabras clave:** Máquina de ensayos, Compresión, Impresión 3D, Propiedades mecánicas, Materiales de refuerzo, Compuestos, SEM.

### Descripción

En este proyecto se estudiaron las propiedades mecánicas a compresión en materiales compuestos de matriz rígida reforzada, utilizando formas de tejido orientadas en los tres ejes coordenados y tres materiales de refuerzo (Fibra de Vidrio, fibra de Carbono y Kevlar), donde para la fabricación de los diferentes compuestos, se empleó la impresora 3D Markforged Mark Two, la cual permitió generar los especímenes que cumplían con los estándares de la norma ASTM D3410. Las pruebas se realizaron en una máquina para ensayos universal MTS Bionix, con una velocidad de 1.5 mm/min y bajo condiciones de ambiente normales. Se pudo apreciar que el carbono fue quien presentó mejores propiedades mecánicas, y además se evidencia que el módulo de elasticidad está ligado al ángulo de impresión de las probetas, mientras que el esfuerzo máximo a compresión se ve influenciado por la cantidad de capas del refuerzo. Así mismo se realizó un análisis de microscopía SEM, donde se identificaron los diferentes tipos de falla producidos bajo estas cargas y se relacionaron con los valores obtenidos experimentalmente. Dados los resultados obtenidos se encontró un material frágil y altamente resistente, cuando se priorizó el Carbono como refuerzo, orientando las capas impresas paralelas al eje de solicitud mecánica y aumentando la cantidad de fibras del material compuesto.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. Alberto David Pertuz Comas, Codirector: PhD Octavio Andrés González Estrada.

### Abstract

**Title:** Study of mechanical properties under compression failure in composite laminated materials with reinforced rigid matrix\*.

**Authors:** Cristian Alejandro Ruiz Florián, Juan David Argüello Bastos\*\*.

**Keywords:** Testing machine, Compression, 3D printing, Mechanical properties, Reinforcement Materials, Composites, SEM.

### Description

In this work, the mechanical properties of compression in reinforced rigid matrix composite materials were studied, by the use of oriented fabric shapes among the three coordinate axes and the use of three reinforcement materials (Fiberglass, Carbon fiber and Kevlar). The Markforged Mark Two 3D printer was used in the manufacturing process of the different compounds, which allowed us to generate the specimens that complied with the norms of the ASTM D3410 standard. The tests were carried out on a Universal MTS Bionix tests machine, with a speed of 1.5 mm/min and under normal ambient conditions. It was observed that carbon was the material that presented the best mechanical properties, and that the modulus of elasticity was linked to the printing angle of the specimens, while the compressive stress was reflected by the amount of reinforcement layers. Likewise, an analysis of SEM microscopy was carried out, where the different types of failure under loads were identified and related to the values obtained experimentally. Given the results obtained, a fragile and highly resistant material were found when Carbon was prioritized as reinforcement, orienting the printed layers parallel to the axis of mechanical application and increasing the amount of fibers of the composite material.

---

\* Degree Project.

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: PhD. Alberto David Pertuz Comas, Codirector: PhD Octavio Andrés González Estrada.

## Introducción

Los materiales compuestos reforzados por fibras, debido a su alta relación fuerza – peso, rigidez – peso; han tenido aplicaciones en diferentes campos, creando materiales fuertes y muy livianos; dentro de las industrias más importantes que han decidido usar estos materiales se encuentran: la aeroespacial, la automotriz, deportiva, entre otras (Goh, y otros, 2017, págs. 79–89). Tales compuestos de matriz polimérica y refuerzo en fibras, ofrecen una resistencia al peso mucho mayor que los materiales estructurales monolíticos; Como resultado de esto, se han convertido en una alternativa bastante atractiva frente al aluminio, en estructuras aeroespaciales y de igual manera fueron considerados posteriormente para vehículos sumergibles. (Chaudhuri & Garala, 1995, págs. 1695–1718)

Estos materiales se pueden desarrollar mediante fabricación por adición, técnica que comúnmente se conoce como impresión 3D, la cual es un método donde materiales como plástico o metal, se depositan entre sí en capas para producir un objeto o pieza tridimensional, estos procedimientos han sido usados principalmente en prototipos de ingeniería, pero con el paso del tiempo se han logrado realizar piezas de importancia en la medicina, incluyendo la oftalmología y odontología. (Schubert, Van Langeveld, & Donoso, 2014, págs. 159–161) Además, esta tecnología puede producir objetos complejos de la mano de los diseños CAD, los cuales han sido usados por empresas, para hacer prototipos a escala y debido a su bajo costo, los han implementado como solución en la manufactura de piezas a escala real. (Leigh, Bradley, Purssell, Billson, & Hutchins, 2012). Estos materiales han tenido gran aceptación desde su introducción hacia los años sesenta, pero debido a las diferentes combinaciones de fibra-matriz, no existe información completa de las

propiedades mecánicas de estos compuestos. (Carlsson, Adams, & Pipes, 2013, págs. 277–302) Durante los últimos años, se han logrado mejoras bastante significativas en la resistencia a la tracción, resistencia a la fatiga y la misma dureza en los compuestos, pero desafortunadamente el esfuerzo a compresión en estos materiales, ha mostrado poca mejoría. (Opelt, Paiva, Cândido, & Rezende, 2017, págs. 342–350)

El efecto de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, específicamente su reacción ante fuerzas de compresión, han sido primeramente investigados utilizando diferentes compuestos de matriz polimérica. (Jelf & Fleck, 1992, págs. 2706–2726. ) Dentro de los primeros experimentos realizados, utilizaron compuestos unidireccionales de carbono-epoxi, para analizar los diferentes modos de falla presentados bajo ensayos de compresión (Odom & Adams, 1990, págs. 289–296) y otros autores se enfocaron en mejorar el esfuerzo a compresión de los compuestos reforzados de fibras de carbono utilizando un compuesto carbono-vidrio (Chaudhuri & Garala, 1995, págs. 1695–1718). Con el desarrollo de las fibras de carbono de ultra alto módulo, (CFRP por sus siglas en inglés) han sido ampliamente usados, especialmente en el área aeroespacial, ya que su comportamiento bajo esfuerzos de compresión es aproximadamente un 60-70% del esfuerzo a tracción y se ha considerado un factor limitante en los parámetros de los diseñadores. (Zhang, Wang, Li, Yang, & Guan, 2018, págs. 24–35)

Estudios recientes realizaron pruebas de resistencia a la compresión, las cuales fueron llevadas a cabo en una máquina Instron, bajo un parámetro de avance de 1.27mm/min, tales muestras fueron preparadas bajo la normativa estándar de prueba ASTM D3410 (Goh, y otros, 2017), (Odom & Adams, 1990), (Paiva, F. De Mayer, & Rezende, 2005, págs. 91–97), donde se estableció cuándo una probeta ha fallado, y se entendió, como el momento en que pierde su capacidad de soportar

carga; con ésto se puede determinar el respectivo análisis para estudiar el tipo de falla ocurrido. (Opelt, Paiva, Cândido, & Rezende, 2017)

Dentro de los resultados obtenidos, diferentes autores remarcan diversos tipos de fallas, donde las predominantes son fallo por cortante, por micro pandeo, aplastamiento y delaminación. (Arifin, Wang, & Matsubara, 2016, págs. 182–193), (Odom & Adams, 1990), (Opelt, Paiva, Cândido, & Rezende, 2017), (Paiva, F. De Mayer, & Rezende, 2005), (Schneider, Kazemahvazi, Åkermo, & Zenkert, 2013, págs. 221–230). Para resinas rígidas dado su alto módulo, se obtuvo que el modo de falla dominante fue por cortante en las fibras en una escala macroscópica (Jelf & Fleck, 1992); realizando estudios de microscopía electrónica (Opelt, Paiva, Cândido, & Rezende, 2017), los autores encuentran diferentes tipos de fracturas en las probetas donde presentan fallo por cortante y además muestran micro pandeo en algunas fibras; en general, se ha creído que el micro pandeo es un fenómeno típico de los materiales compuestos al ser sometidos bajo esfuerzos de compresión longitudinal (Zhang, Wang, Li, Yang, & Guan, 2018). Para ello, los análisis realizados a través de un microscopio de disección, se ejecutaban en caso de ser encontradas anomalías en la curva de esfuerzo-deformación, el espécimen debía ser desmontado y examinado en busca de daños, donde tales muestras fallidas se inspeccionaron en microscopios de disección con zoom de hasta 300X. (Goh, y otros, 2017)

Se ha confirmado que las imperfecciones de las fibras, juegan un papel decisivo en la fortaleza real de los compuestos, donde tales defectos se pueden producir en el proceso de fabricación de la fibra y se encuentran distribuidas en espacios periódicos a lo largo de la misma (Argon, 1972), de igual manera, la unión imperfecta entre la matriz y la fibra, también se genera en el proceso de curado, estos defectos influyen en la función de la matriz, que ayuda a soportar la carga a compresión aplicada en el material (Torabizadeh, 2013). Cuando la carga aplicada en el compuesto

se analiza en éstas micro secciones con imperfecciones, se genera un esfuerzo cortante en la matriz del mismo (Leigh, Bradley, Purssell, Billson, & Hutchins, 2012), y además pueden conducir a dobleces con distintas orientaciones y anchuras. (Kyriakides, Arseculeratne, Perry, & Liechti, 1995, págs. 689–738)

El método para analizar el esfuerzo a compresión en materiales compuestos con comportamiento lineal, para cada punto durante la prueba, se realiza conforme a lo especificado en el ítem 12 de la norma ASTM D3410.

$$F^{cu} = p^{max} / A$$

Donde:

$F^{cu}$  = Fuerza compresión (MPa)

$p^{max}$  = Fuerza máxima antes del fallo (N)

$A$  = Sección transversal ( $mm^2$ )

Mientras que para el cálculo del módulo de elasticidad E, la misma norma presenta la siguiente ecuación,

$$E^{chord} = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

Donde:

$E^{chord}$  = Módulo de elasticidad (MPa)

$\Delta\sigma$  = Delta esfuerzo a compresión entre dos puntos

$\Delta\epsilon =$  *Delta deformación entre dos puntos*

Para materiales donde se evidencia un comportamiento no lineal, en las curvas de esfuerzo-deformación, obtenidas experimentalmente, es necesario precisar que la matriz presenta esta conducta, a medida que la deformación aumenta, por lo cual la rigidez del compuesto se ve reducida (Leigh, Bradley, Pursell, Billson, & Hutchins, 2012); en este caso se aclara, que la resistencia máxima bajo cargas a compresión, no corresponde necesariamente con el inicio de la fluencia en la matriz, sino que está dictada por la interacción entre la no linealidad de la matriz y la desalineación inicial de las fibras (Davidson & Waas, 2016, págs. 667–684). Por esta razón se hace necesario realizar una aproximación mediante las ecuaciones empíricas de Hollomon (CAO, LI, MA, & SUN, 2017), ya que proporcionan una mejor contigüidad a los resultados experimentales, con el fin de obtener el módulo de elasticidad.

$$\sigma = K * \epsilon^n$$

Donde:

$\sigma =$  *Esfuerzo*

$K =$  *Coficiente de resistencia (propia del material)*

$\epsilon =$  *Deformación real*

$n =$  *Coficiente de endurecimiento por deformación (propia del material)*

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, se resalta la importancia de conocer el comportamiento de este tipo de materiales bajo esfuerzos a compresión.

## 1. Descripción del proyecto

### 1.1 Planteamiento del problema

A través de los años es posible encontrar en torno al tema de los materiales una amplia información, la cual se centra siempre en la innovación, mejora y estudio de nuevas materias. El hombre siempre ha buscado utilizar una mezcla de materiales o elementos para mejorar las propiedades mecánicas dando como resultado, materiales compuestos con comportamientos estructurales superiores a los ya existentes, tal y como sucede en el hormigón. Por otra parte, los investigadores están reconociendo en la naturaleza la existencia de materiales compuestos, como lo es en la madera, conformada por una matriz celulosa reforzada por fibras, teniendo la posibilidad de hallar mediante la biomímica mejoras en propiedades mecánicas tales como la elasticidad y dureza. (McHenry & Stachurski, 2003, págs. 171–181)

La necesidad de reunir muchas características que no se encuentran naturalmente en cada material por unidad, ha despertado un gran interés, y a que se lleven a cabo estudios en este campo tan reciente, que vive en constante cambio; todo esto para mejorar los rendimientos, la calidad del material y los costos, cada vez más exigentes por parte del sector de la manufactura, en la industria existe una alta demanda orientada hacia una excelente relación resistencia – peso donde los materiales compuestos son la respuesta a estas exigencias. A medida que los estudios siguen indagando en este tema, se encuentra que aún existen inconvenientes que se pueden mejorar con lo que respecta a la resistencia y la dureza, encontrando la necesidad de crear compuestos

reforzados por fibras, logrando así mejorar las propiedades mecánicas de estos materiales de por sí muy buenas, gracias a su forma de tejido o matriz.

Al hacer énfasis en las diferentes características que podemos encontrar variando la forma del tejido, es donde este estudio encuentra un amplio campo de desarrollo ya que los ensayos, materiales, tejidos, y demás componentes a analizar, generan un nuevo valor cada vez que alguno de los elementos anteriormente mencionados varía, por lo tanto, es importante seguir investigando, realizando nuevas configuraciones en los modelos estructurales y analizando los resultados de éstas. Además, estos estudios sirven como referencia al momento de utilizar diferentes softwares de diseño, los cuales se utilizan para realizar simulaciones computacionales donde se analizan las nuevas exigencias para esos materiales

## **1.2 Justificación para solucionar el problema**

Los materiales compuestos siguen presentando innovaciones para conseguir mayores alcances y mejores propiedades basándose en su necesidad, para algunos casos no se consigue satisfacer todos los requerimientos por lo cual es necesario el estudio de los compuestos reforzados por fibras, los cuales brindan mayor resistencia al material confiriendo alguna propiedad que la matriz no posea, ya que constan de una matriz que suele ser una resina combinada con agentes reforzantes conocidos como fibras de carbono, vidrio o kevlar.

En las diferentes aplicaciones se evidencia, que los compuestos son más comúnmente usados como materiales a tracción y los estudios van enfocados hacia ese ámbito, por lo cual realizar un estudio donde los compuestos reforzados por fibras se caractericen a compresión es de gran ayuda

para tener como base nueva información de éstos materiales para próximos casos de estudio a nivel ingenieril.

A demás, existe gran facilidad ofrecida por la Universidad Industrial de Santander para realizar trabajos de investigación a través de diferentes máquinas, como es la impresora 3D Markforged - Mark Two con capacidad de imprimir fibra de vidrio, fibra de carbono y kevlar en un espacio de trabajo de 320x132x154 mm y la máquina para ensayos MTS Bionix capaz de realizar ensayos de fatiga, tensión y compresión de biomateriales con capacidad de fuerza hasta 25 KN, con desplazamientos estándar de hasta 50 mm.

Con la información recopilada y el análisis de resultados realizado se sirve como plataforma de inicio para nuevos casos de estudio, determinando la importancia del material y los posibles usos que puede ofrecer en la industria partiendo de la necesidad que haya en el momento.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Estudiar las propiedades mecánicas a compresión en materiales compuestos de matriz rígida reforzada, utilizando formas de tejido orientadas en los tres ejes coordenados y tres materiales de refuerzo.

### 2.2 Objetivos Específicos

Estudiar el arte relacionado a las propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados por fibras.

Diseñar e imprimir probetas según norma ASTM D3410, de material compuesto en base Nylon, para analizar las características a compresión, variando el compuesto del refuerzo en los siguientes materiales:

- Fibra de carbono
- Fibra de kevlar
- Fibra de vidrio

Estudiar el comportamiento a compresión de materiales compuestos reforzados con fibras utilizando los tipos de malla (triangular, rectangular y hexagonal) y variando la orientación de su tejido en las siguientes direcciones:

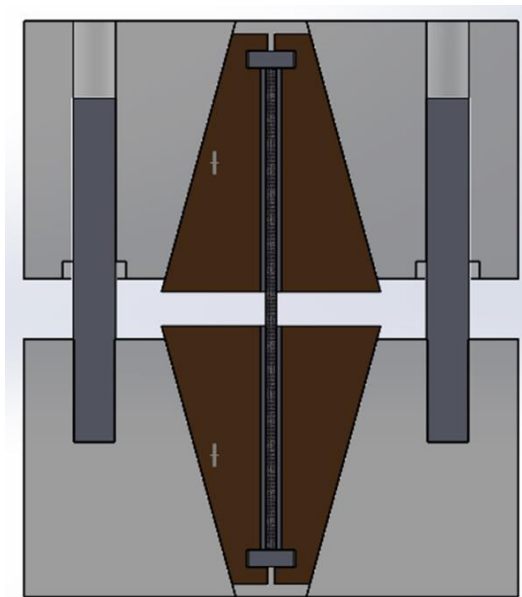
- 0 grados, unidireccional.
- 90 grados, unidireccional.
- Especialmente ortotrópicas.

Comparar los resultados obtenidos mediante las diferentes combinaciones realizadas en la impresión de los compuestos reforzados por fibras para determinar las características del material que presenta mejores propiedades mecánicas.

Evaluar la relación estructura - propiedades de los resultados obtenidos.

### 3. Metodología

Los ensayos de compresión de materiales compuestos reforzados por fibras necesitan ciertos accesorios para realizar una correcta toma de datos. Para este proyecto se utilizó la configuración desarrollada por el Instituto de Tecnología e Investigación de Illinois (IITRI, por sus siglas en inglés) (Hofer & Rao, 1977), el cual hace parte de la norma ASTM D3410 (ASTM International, 2003, págs. 1–16. ) desde 1987, de allí fueron extraídas las características y dimensiones necesarias para realizar el diseño como se ve en la Figura 1, donde la principal característica de este soporte es evitar el pandeo en la probeta.



*Figura 1.* Diseño de la mordaza tipo IITRI.

Para la fabricación de las probetas, se empleó la Impresora 3D Markforged Mark Two, propiedad de la Escuela de Ingeniería Mecánica, la cual permite trabajar con nylon como la matriz principal y tres tipos de refuerzo, para este caso: fibra de vidrio, fibra de carbono y kevlar. El diseño de las probetas se realizó conforme a lo especificado en el aparte 8.2 Geometría, de la norma ASTM D3410 (ASTM International, 2003), imprimiendo una cantidad de 5 probetas por cada ensayo realizado; en la Figura 2 se presentan las dimensiones reales utilizadas en los ensayos, mostrando que el ancho de la probeta varía dependiendo de la dirección de las fibras de refuerzo, donde para  $0^{\circ}$  es 10mm, mientras que para los demás ángulos de refuerzo se utilizó 25mm. El espesor de 3mm se escogió teniendo en cuenta el esfuerzo de compresión y módulo longitudinal esperado.

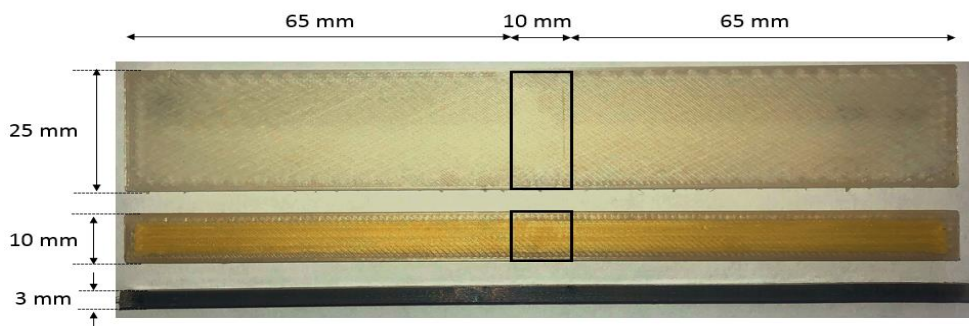


Figura 2. Geometría de las probetas para ensayos de compresión.

Además, esta impresora cuenta con el software en línea Eiger, que permite variar diferentes parámetros para encontrar la mejor combinación de resistencia. En la Tabla 1 se presentan las características que se mantuvieron constantes.

Tabla 1.

*Parámetros de impresión para las probetas.*

| <b>Material de la matriz</b> |            |
|------------------------------|------------|
| Material                     | Nylon      |
| Altura de capa               | 0.1 mm     |
| Densidad de llenado          | 50%        |
| Cantidad de capas superiores | 4          |
| Cantidad de capas inferiores | 4          |
| Capas de las paredes         | 2          |
| Total de capas               | 30         |
| <b>Material de refuerzo</b>  |            |
| Tipo de llenado              | Isotrópico |
| Aros concéntricos            | 0          |

### 3.1 Patrón de llenado.

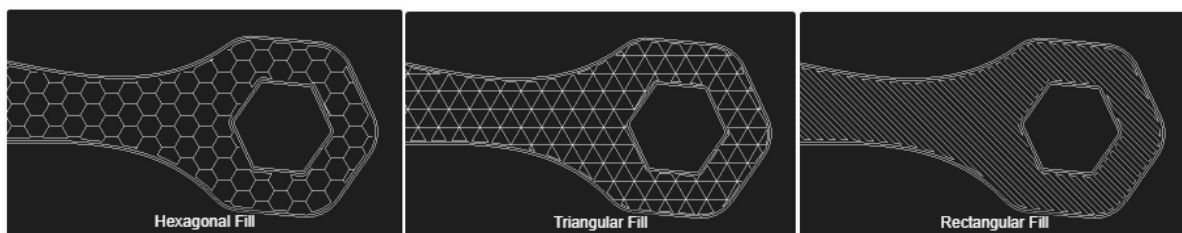


Figura 3. (a) Patrón hexagonal (b) Patrón triangular (c) Patrón rectangular.

Se realizó este primer ensayo variando los diferentes patrones de llenado de la matriz como se muestra en la Figura 3, y se establecieron los parámetros presentados en la Tabla 2. Además, se realizó un ensayo preliminar para analizar la influencia de la longitud de la sección de ensayo (cuello) de la probeta en el rango permitido por la norma entre 10 y 25 mm.

Tabla 2.

*Parámetros para establecer el mejor patrón de llenado.*

| Patron de llenado        | Triangular      |
|--------------------------|-----------------|
|                          | Hexagonal       |
|                          | Rectangular     |
| Material de refuerzo     | Fibra de vidrio |
| Ángulo de la fibra       | 90 <sup>0</sup> |
| Número de capas de fibra | 12              |

### 3.2 Ángulo de la fibra.

Al determinar el mejor patrón de llenado, se definió la matriz con mejores características para analizar en detalle el material de refuerzo. Así que el primer parámetro que se modificó para este refuerzo fueron los siguientes ángulos, manteniendo la configuración mostrada en la Tabla 3.

Tabla 3.

*Parámetros para analizar los ángulos de refuerzo.*

| Patrón de llenado        | Triangular   |
|--------------------------|--|
| Material de refuerzo     | Fibra de vidrio  |
| Ángulo de la fibra       | $0^{\circ}$ , $\pm 30^{\circ}$ , $\pm 45^{\circ}$ y $90^{\circ}$ |
| Número de capas de fibra | 12   |

### 3.3 Cantidad de capas de refuerzo.

Es otro parámetro importante para analizar, debido a que una fracción mayor en volumen de fibras, incrementa la resistencia y la rigidez del compuesto. Sin embargo, la fracción máxima en volumen de fibras es aproximadamente el 80%, más allá de esta cantidad, éstas ya no quedan totalmente rodeadas por la matriz, obteniéndose un material no tan resistente. Como se muestra en la Tabla 1, de las 30 capas impresas, queda un rango disponible entre 2 y 22 capas, alcanzando un volumen máximo de 73.33%. Con esta información se diseñó el experimento, tal cual como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4.

*Parámetros para analizar la influencia de la cantidad de capas de refuerzo.*

| Patrón de llenado        | Triangular                   |
|--------------------------|------------------------------|
| Material de refuerzo     | Fibra de vidrio              |
| Ángulo de la fibra       | $\pm 30^{\circ}$             |
| Número de capas de fibra | 6 (20%), 12 (40%) y 18 (60%) |

### 3.4 Tipo de material

Con los resultados obtenidos en las pruebas antes mencionadas, quedaba un último ensayo, variar los materiales disponibles para analizar cuál posee mejores características, a continuación, en la Tabla 5, se establecieron los parámetros pertinentes.

Tabla 5.

*Parámetros para analizar los diferentes materiales de refuerzo.*

|                                 |                   |
|---------------------------------|-------------------|
| <b>Patrón de llenado</b>        | <b>Triangular</b> |
|                                 | Fibra de vidrio   |
| <b>Material de refuerzo</b>     | Kevlar            |
|                                 | Fibra de Carbono  |
| <b>Ángulo de la fibra</b>       | 0°                |
| <b>Número de capas de fibra</b> | 12                |

Después de realizar las respectivas impresiones, el ensayo de compresión se realizó acorde a la norma ASTM D3410 (ASTM International, 2003), cabe aclarar que ésta propone el uso de unas cuñas que van pegadas a las probetas las cuales son opcionales y en estas pruebas no se usaron. Para los ensayos, se utilizó la máquina universal de ensayos MTS Bionix, que se configuró a una velocidad de avance de 1.5 mm/min, además se especifica que las pruebas se realizaron a temperatura ambiente y las probetas se almacenaron con sílica, con el fin que la humedad no afectara las propiedades de las mismas. El respectivo montaje se muestra en la Figura 4, donde la mordaza ya está ensamblada y la verticalidad de la probeta fue comprobada mediante un medidor láser, para dar inicio a la prueba de compresión.

Para determinar el modo de falla, el cual puede ocurrir por diferentes razones que a simple vista no se pueden identificar, la norma ASTM D3410 tiene una ayuda que permite clasificar y determinar su aceptabilidad mediante la *Fig. 9* de la misma (ASTM International, 2003). Después que la probeta falló se siguió aplicando fuerza para que la fractura se continuara propagando y así fuera más fácil identificar los diferentes modos de falla.



*Figura 4.* Montaje para el ensayo de compresión según ASTM D3410.

Al concluir el ensayo, se utilizó lo propuesto por la norma ASTM D3410 (ASTM International, 2003), teniendo en cuenta los siguientes numerales: Aparte *11.10 Códigos de identificación de las fallas*: allí se detalló el tipo de falla de la probeta (aspecto visual externo), para determinar su aceptabilidad. Aparte *12. Cálculos*: seguidamente se utilizaron las ecuaciones establecidas para

los cálculos propuestos de las propiedades mecánicas de los compuestos, los valores promedio se calcularon para las 5 probetas fracturadas. Finalmente, se realizó un respectivo análisis interno de la microestructura, las muestras se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbon, y se revistieron con oro en un equipo de recubrimiento Quorum 150ES. Con el fin de establecer la relación estructura-comportamiento mecánico observado, se utilizó un microscopio electrónico de barrido FEG Quanta 650 FEG ambiental, donde se tomaron imágenes en alto vacío con un voltaje de aceleración de 25kV, mediante un detector para imágenes de electrones secundarios (SE) (everhart thornley detector ETD) y así mismo para electrones retrodispersados (BSE) (back scattered electron detector BSED) tipo SSD.

#### **4. Resultados y su análisis.**

Con los primeros ensayos donde se modificaron aspectos que concernían a la matriz de refuerzo, se encuentra que a mayor longitud de la sección de ensayo, se incrementa la posibilidad que se genere una falla por pandeo, reduciendo la capacidad de soportar carga, por tal motivo, se estableció la mínima longitud permitida para el resto de probetas que se decidieron fabricar. Los resultados promedio para cada longitud analizada se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.

*Valores del Esfuerzo máximo para diferentes cuellos de la probeta.*

| <b>Patron de llenado triangular</b> |                              |
|-------------------------------------|------------------------------|
| <i>Sección de Ensayo (mm)</i>       | <i>Esfuerzo máximo (MPa)</i> |
| <b>25</b>                           | 29.39                        |
| <b>12</b>                           | 37.55                        |
| <b>10</b>                           | 42.64                        |

Los resultados promedio de los ensayos realizados con los diferentes patrones de llenado a un cuello de 10 mm, se presentan en la Tabla 7., allí se aprecia que el patrón triangular es el más resistente debido a su configuración geométrica, tal como se analizó en los ensayos a tracción (Beltrán Guarín, 2017). Es por ello que se utilizó como el patrón de llenado para los ensayos posteriores.

Tabla 7.

*Valores del Esfuerzo máximo para diferentes patrones de la matriz.*

| <b>Patrón de llenado</b> | <b>Esfuerzo máximo (MPa)</b> |
|--------------------------|------------------------------|
| <b>Triangular</b>        | 42.64                        |
| <b>Rectangular</b>       | 37.88                        |
| <b>Hexagonal</b>         | 33.76                        |

Los modos de falla tienen cierta clasificación según el aparte *11.10* de la norma ASTM D3410 (ASTM International, 2003). En la Figura 5, se presentan algunas probetas con diferentes tipos de

falla señalando los lugares donde se registró ruptura de fibras. Éstos se analizaron de manera visual externa, por lo cual se consideraron aceptable las que presentaron fractura en el cuello de la probeta identificándolas con las siglas TGM, del inglés “Transverse Shear, Gage, Middle”, indicando falla por cortante en la zona media del cuello, mientras que la que presentó rompimiento de fibras en las zonas extremas del espécimen, se identificó con las siglas TIT, del inglés “Transverse Shear, Inside Grip/Tab, Top”, indicando que el corte fue en la zona interna superior de la mordaza y se definió como no aceptable.

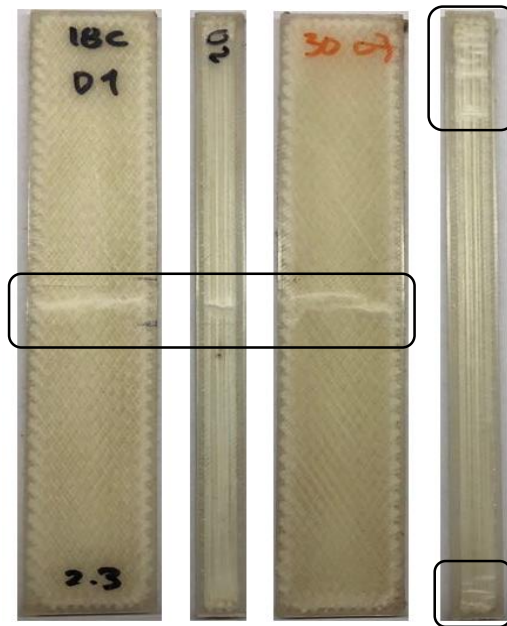


Figura 5. Codificación de probetas según el tipo de falla presentado.

De acuerdo con los resultados anteriores, el primer ensayo que se realizó para analizar el comportamiento de las fibras de refuerzo fue el de los ángulos, donde se observa una coherencia, indicando que siempre que las fibras tiendan a estar paralelas al eje en el cual se aplica la carga, estas van a tener mayor módulo de elasticidad que las demás; además, se evidencia que la probeta

orientada a 0 grados presenta mayor fragilidad, mientras que la resistencia máxima se encuentra para la que fué impresa a 30 grados (56.2 MPa), como se observa en la Figura 6.

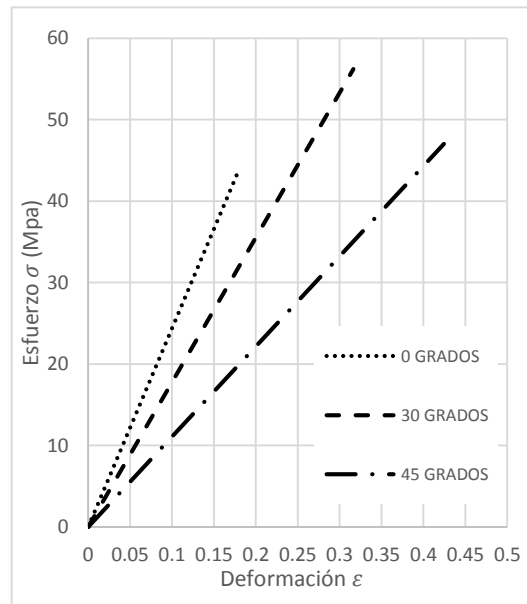


Figura 6. Gráfica  $\sigma$  vs  $\epsilon$  para los diferentes ángulos analizados a 12 Capas de refuerzo.

Luego de analizar el comportamiento de los ángulos, se estudia, la influencia de las capas de refuerzo a un ángulo de 30 grados, dando como resultado un incremento en la resistencia última a medida que aumentaban las capas en el material como se muestra en la Figura 7, que presenta la gráfica de esfuerzo-deformación de las tres capas de refuerzo estudiadas, confirmando que a mayor cantidad de capas, mayor resistencia y una mejora significativa cuando se estima el módulo de elasticidad; por otra parte, con el material reforzado por 6 capas, se obtuvo el más bajo esfuerzo a compresión, debido a la poca cantidad de fibras que soportan la carga, produciendo una ruptura temprana.

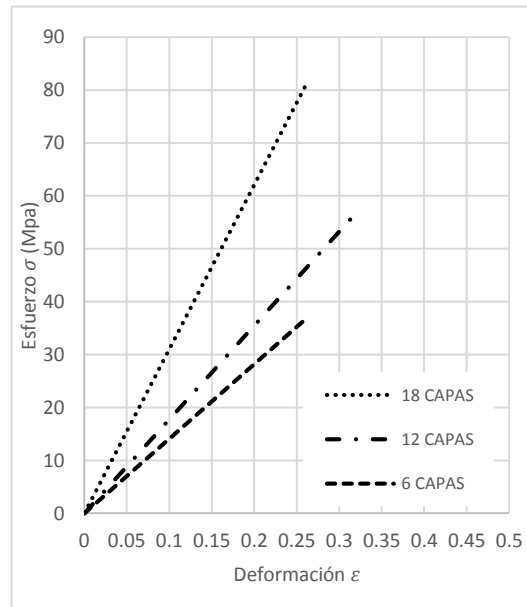


Figura 7. Gráfica  $\sigma$  vs  $\epsilon$  para para fibra de vidrio a 30 grados variando la cantidad de capas de refuerzo.

El siguiente estudio realizado se enfocó en analizar la diferencia entre los tipos de materiales disponibles en la impresora, tomando en cuenta el ángulo de mayor módulo de elasticidad, como se conoce en la literatura, el más resistente fue la fibra de carbono seguido de la fibra de vidrio y finalmente el Kevlar, información que se puede comprobar en la Figura 9. En este ensayo se encontraron diferentes características a tener en cuenta, la primera de ellas es que tanto la fibra de carbono como de vidrio sufrieron ruptura o agrietamiento en alguna de sus fibras en la parte extrema de las probetas Figura 8.a), antes de llegar a la resistencia última, cuando la probeta falla en la zona aceptable de ensayo Figura 8.b).

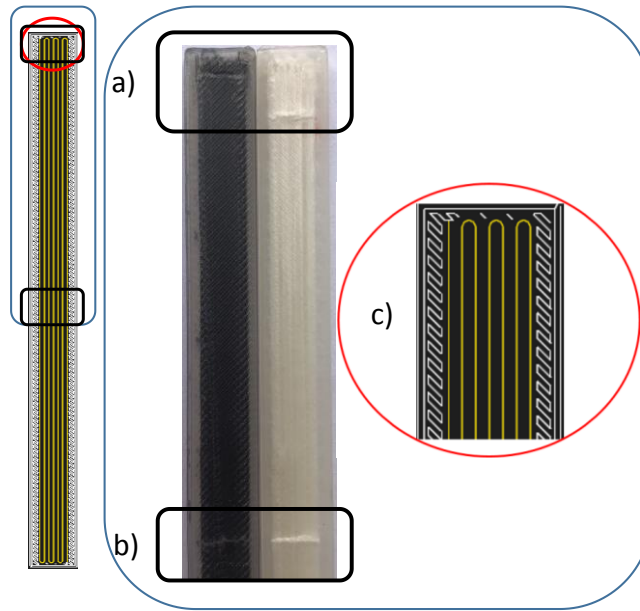


Figura 8. a) Ruptura de fibras al extremo de la probeta. b) Sección de ensayo aceptable para que ocurra la falla. c) Método de impresión de las probetas a 0 grados.

Así mismo en la Figura 9 se sustenta lo analizado anteriormente mediante una gráfica de esfuerzo-deformación; cuando se aprecia un cambio en la pendiente de la recta, es donde se produjo la ruptura o agrietamiento en algunas fibras a los extremos de la probeta, pero esto no es motivo para dar por terminado el ensayo, ya que aún no había perdido capacidad de soportar carga, tal como se puede apreciar en la gráfica, donde las rectas continúan de manera creciente, hasta que la probeta falla en la zona del cuello. Por este motivo el módulo de elasticidad calculado para estos materiales, se consideró un módulo de elasticidad aparente.

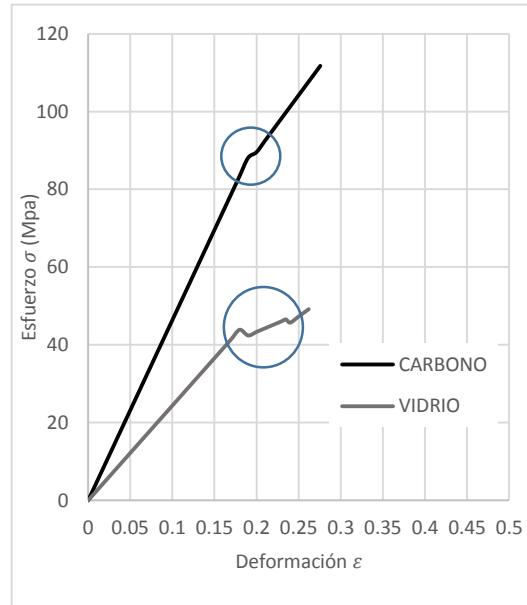


Figura 9. Gráfica  $\sigma$  vs  $\epsilon$  donde se muestran los cambios en la pendiente debido a ruptura temprana de fibras.

Es de notar que el Kevlar no presentó este módulo aparente, pero por su parte tuvo un comportamiento elástico no lineal como se puede apreciar en la Figura 10, para poder hallar el módulo de elasticidad, se utilizó un modelo (CAO et al., 2017) el cual ajustara la curva de la gráfica a un valor real aproximado. Además, se presentan las curvas de esfuerzo deformación para los materiales estudiados, donde se observa que el carbono es quien posee la mayor resistencia mecánica y además es el mayor módulo de elasticidad aparente, con una diferencia significativa con respecto a lo obtenido tanto para la fibra de vidrio como para el kevlar.

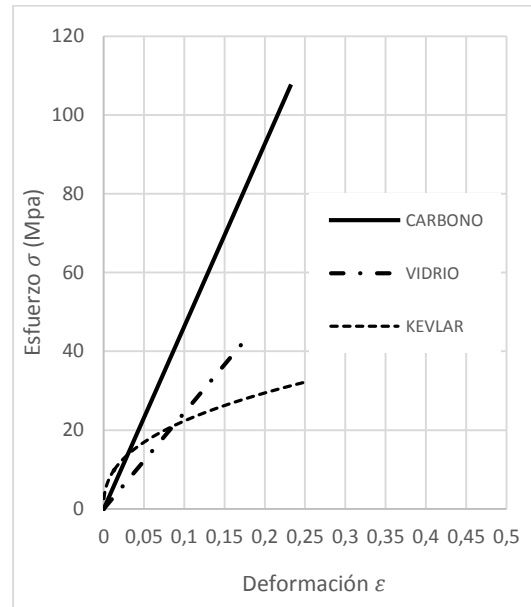


Figura 10. Gráfica  $\sigma$  vs  $\epsilon$  donde se varían los materiales de refuerzo, manteniendo 12 capas y  $0^\circ$ .

Los valores promedio arrojados por las gráficas presentadas en las Figuras 5,6 y 9, se relacionan en las Figuras 11 y 12, donde se muestran los esfuerzos máximos y los módulos de elasticidad calculados para cada prueba realizada.

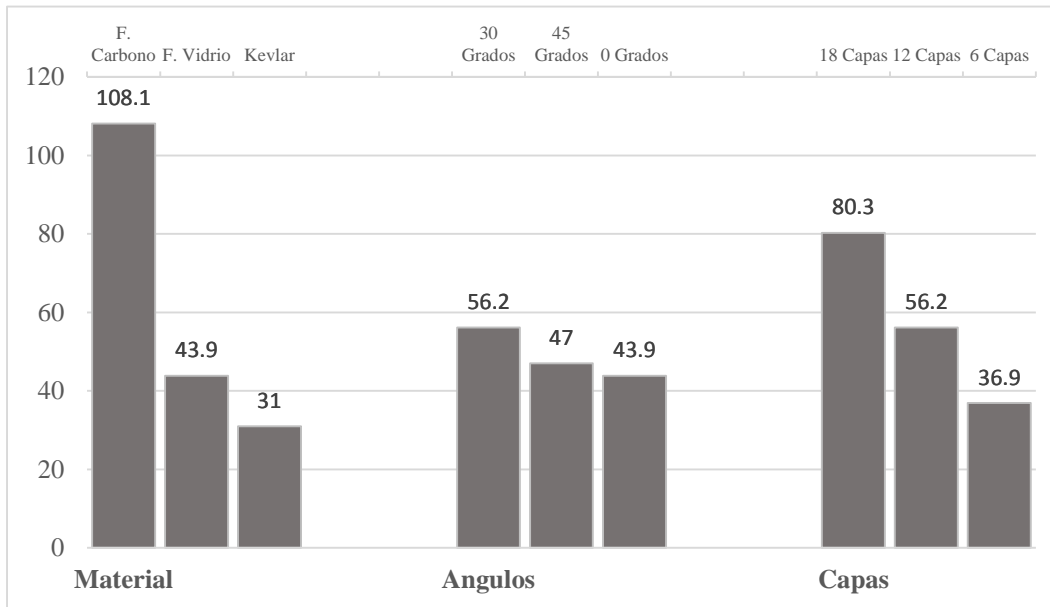


Figura 11. Valores promedio del esfuerzo máximo a compresión de los ensayos realizados.

Para los esfuerzos a compresión promedios en las pruebas a 0 grados que presentaron ruptura en alguna de sus fibras en los extremos, se tomó el valor en ese momento, aun cuando soportaron un poco más de carga. Se observa en la Figura 11 que después del material de refuerzo el siguiente criterio de mayor importancia es la cantidad de capas que se utilizan en el compuesto, así como se evidencia en la fibra de vidrio, el mayor es el de 18 capas, seguido por las 12 capas a diferentes ángulos y finalmente la más débil de solo 6 capas. Se confirma que la ruptura de algunas fibras a los extremos de las probetas, afectó significativamente la capacidad de soportar carga, falla que se presume, fue producida, por el método de impresión del material en esta dirección, como se señala en el diseño al interior de la misma en la Figura 8.c), determinando la configuración a 30 grados como la más resistente. Además es posible establecer una relación proporcional con el incremento de las capas de refuerzo, con respecto a las 6 capas, señalando que para 12 capas se logró un

incremento en torno al 54%, y además para las 18 capas se estableció un aumento de aproximadamente 112%.

La Figura 12 presenta los valores promedio calculados del módulo de elasticidad de todos los ensayos realizados, donde se evidencia que al igual que en el esfuerzo de compresión, el material es la característica más relevante y la que brinda mejores características, aunque para esta propiedad mecánica, tiene mayor importancia los ángulos del material de refuerzo que la cantidad de capas añadidas, lo que se puede comprobar comparando la Fibra de vidrio a 30° y 6 capas (140.8 Mpa), con la Fibra de vidrio a 45° y 12 capas (110.8 Mpa), confirmando que la orientación de las fibras con respecto al eje de sollicitación mecánica influye de gran manera en el módulo de elasticidad, estableciendo un incremento con respecto a la orientación de 45 grados, del 60% para el ángulo de 30 grados, y del 120% para el ángulo a 0 grados.

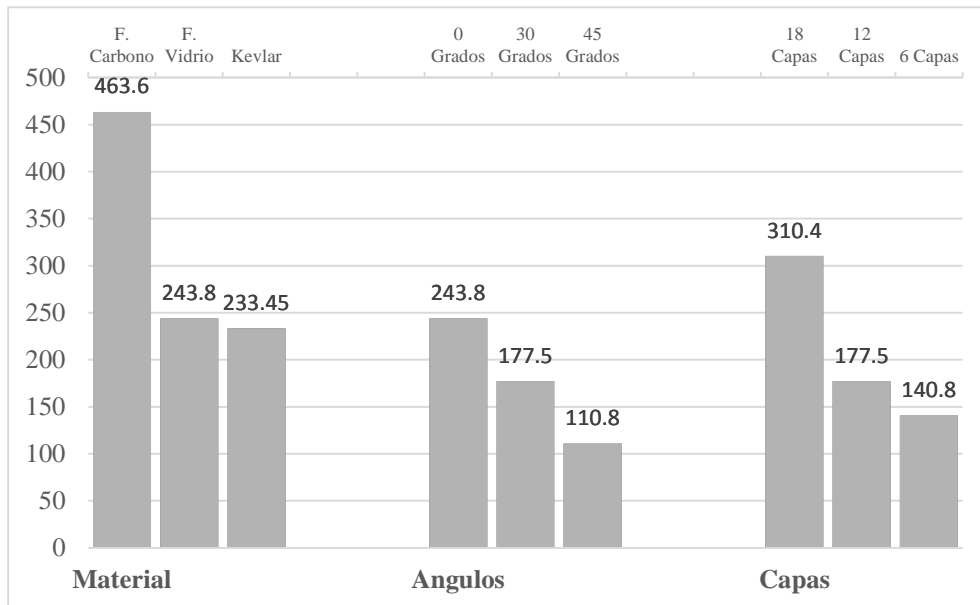


Figura 12. Valores promedio del Módulo de elasticidad calculado para los ensayos realizados.

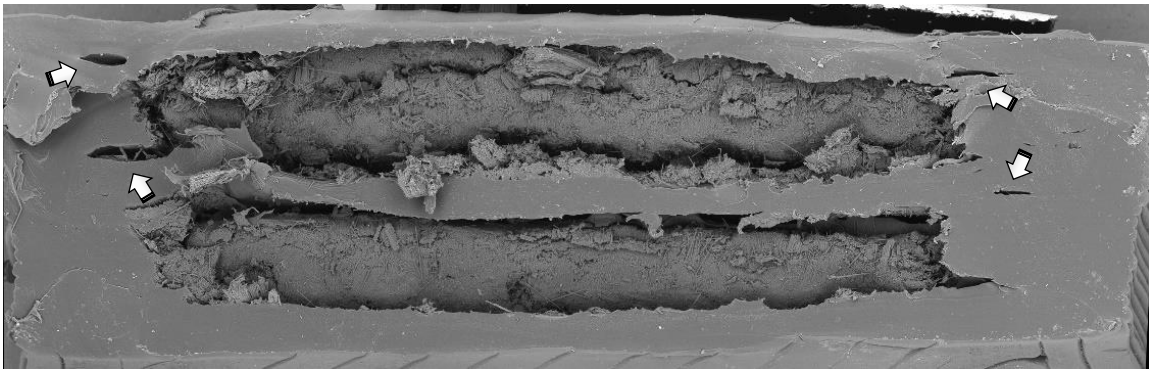
Después de analizar los resultados de las propiedades, se estableció una relación costo-beneficio, para priorizar las características al momento de fabricar un compuesto sobresaliente. Se presume que es más importante el ángulo de impresión de las capas, debido que al incrementar la cantidad, aumentan las propiedades mecánicas analizadas y así mismo los costos de fabricación, como se aprecia en la Tabla 8, donde se presenta una variación aproximadamente de  $\pm 35\%$  en el costo al momento de incrementar o disminuir en 6 la cantidad de capas del material, teniendo como referencia las 12 capas; Así mismo el Carbono es el material más costoso, con un valor que duplica a los demás, estableciendo una relación que indica mejores propiedades a un mayor precio, definiendo el material de refuerzo como el criterio más importante al momento de realizar el diseño de las piezas.

Tabla 8

*Costos de impresión de las probetas.*

| <b>Costos de impresión</b>            |             |
|---------------------------------------|-------------|
| Probeta                               | Valor (USD) |
| F. Carbono 0 <sup>0</sup>             | 4.40        |
| F. Vidrio 0 <sup>0</sup>              | 2.22        |
| Kevlar 0 <sup>0</sup>                 | 2.74        |
| <b>Fibra de Vidrio 30<sup>0</sup></b> |             |
| 18 Capas                              | 8.97        |
| 12 Capas                              | 6.62        |
| 6 capas                               | 4.15        |

El análisis de microscopía arrojó una gran cantidad de detalles que sirven para complementar los resultados obtenidos experimentalmente, En la Figura 13 se aprecia la sección transversal de una probeta en su zona de falla, donde se destacan claramente las capas de nylon, el cual se funde completamente e indica una buena cohesión entre la matriz y la fibra; que, para este análisis, son dos impresiones de 6 capas de fibra de carbono en cada una. Se observan unos imperfectos en el nylon como espacios vacíos, donde se podría mejorar la impresión, pero éstos son insignificantes en comparación con la cantidad de fibras adheridas a la matriz.



*Figura 13.* Sección transversal de la probeta de Fibra de Carbono en la zona de falla.

En la Figura 14 se aprecia la misma probeta de fibra de carbono la cual está impresa a 0 grados con respecto a la dirección de la carga aplicada, apreciando la ruptura de éstas fibras en diferentes lugares, donde la falla predominante se da por cortante a través del espesor de la probeta, dejando fibras fracturadas y fragmentos desorientados, con lo que se presume sea la característica que permita presentar altos valores en las propiedades estudiados. Además se ve cómo el nylon se funde con algunos filamentos logrando rodearlos, aumentando su resistencia, permitiendo que no se fracturaren en múltiples partes como se resalta en la imagen.

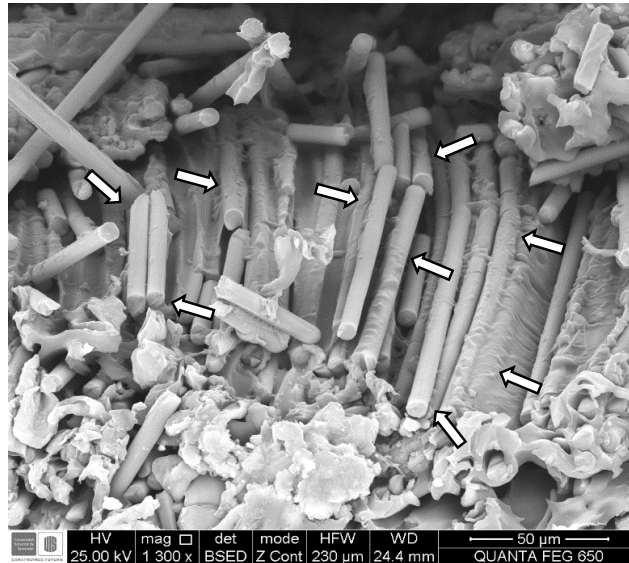


Figura 14. Fibras de Carbono fracturadas

Desde la vista superior en una probeta de fibra de vidrio orientada a 30 grados como se muestra en la Figura 15, se pueden apreciar claramente los efectos de la compresión, presentando múltiples modos de falla en la zona de la fractura. El fallo principal y más visible es el dado por cortante, del inglés “In-plane Shear”, lo que indica una fractura total de las fibras, que para este caso cumple con una tendencia de corte de  $\pm 45$  grados con respecto a la dirección de la sollicitud mecánica (eje Y) como se señala en la Figura 15 A), de acuerdo con los autores Odom & Adams (1990), este tipo de falla ocurre debido a la ausencia de una adecuada estabilidad lateral, lo que además podría generar algunos casos de micro pandeo, falla que se logra apreciar y aunque no sea determinante, es necesario señalarla; este modo hace parte de las fallas interlaminares, y se presenta como un micro pandeo que genera delaminación a lo largo de ciertas fibras, situación que se presenta también en la Figura 15 A, conocida del inglés “Delamination Buckling”.

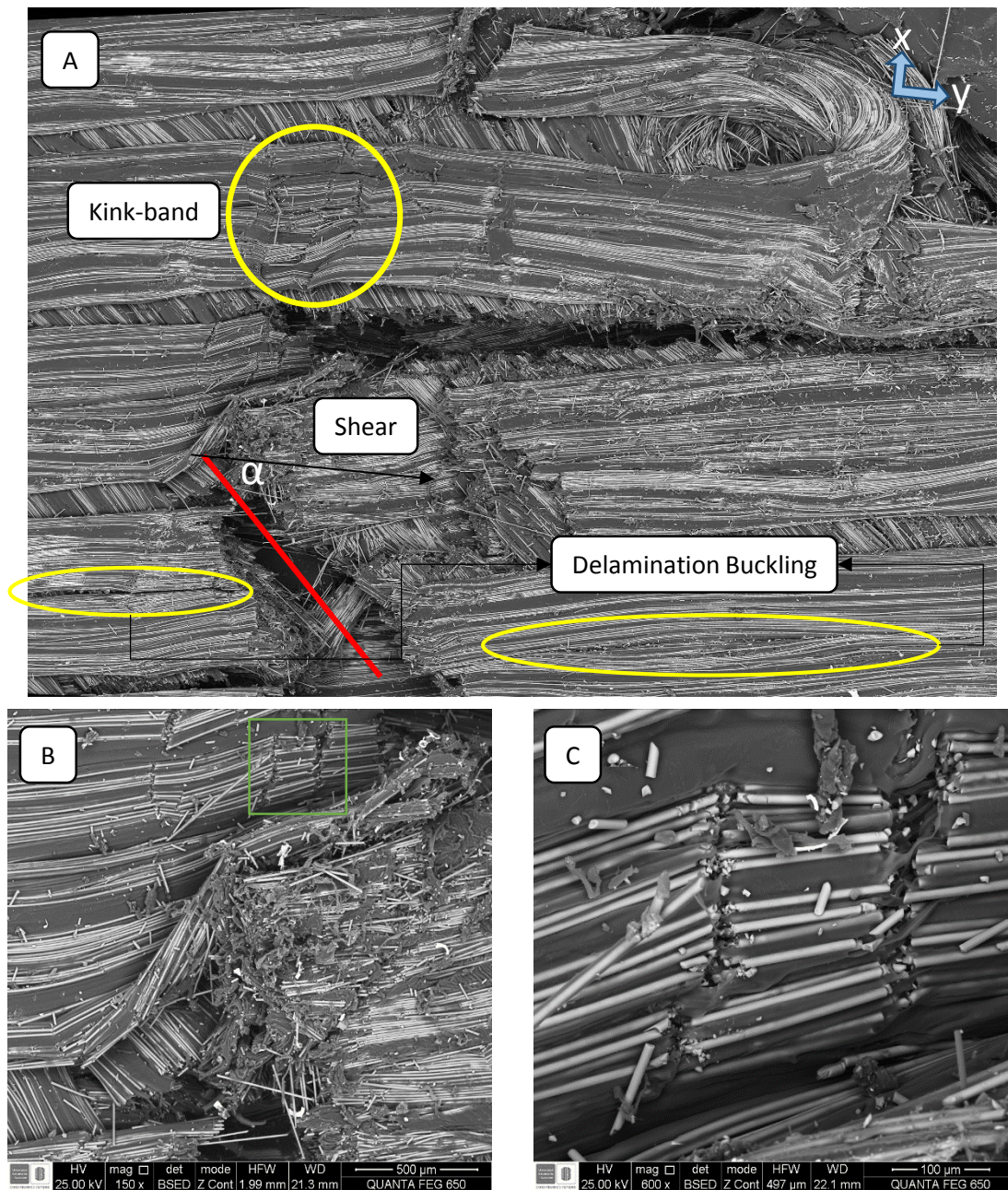


Figura 15. A. Vista superior de la fractura a compresión de fibras orientadas a 30 grados. B. Fractura de modo Brooming. C. Fractura de modo Kink-band.

En la Figura 15 B, se observa en detalle, una zona de la falla, donde se aprecia un modo superficial que se distingue porque las fibras que se fracturan, se superponen entre sí, generando

un efecto de fibras deshilachadas, del inglés “Brooming”. La siguiente falla que se aprecia, es una ruptura por cizallamiento, del inglés “kink-band failure”, la que se identifica por micro fracturas en las fibras, ya que, debido a la compresión, éstas empiezan a presentar micro pandeo local, que finalmente llevan a una fragmentación, generando un cambio suave en la orientación de las mismas, relacionando de esta manera el efecto cizalla, la Figura 15 C muestra en detalle el modo de falla descrito.

A manera más detallada, se observa otro modo de falla el cuál se presenta en la Figura 16, donde se señalan las características de la fragmentación de las fibras, las cuales debido a la fuerza soportada presentan múltiples rupturas a lo largo de los filamentos en la zona de ensayo; fractura que se presume como fibras estrelladas, del inglés “Fiber Crushing”. Esta característica es típica a compresión en el modo interlaminar, dada la colisión de las fibras cuando se continúa aplicando la carga.

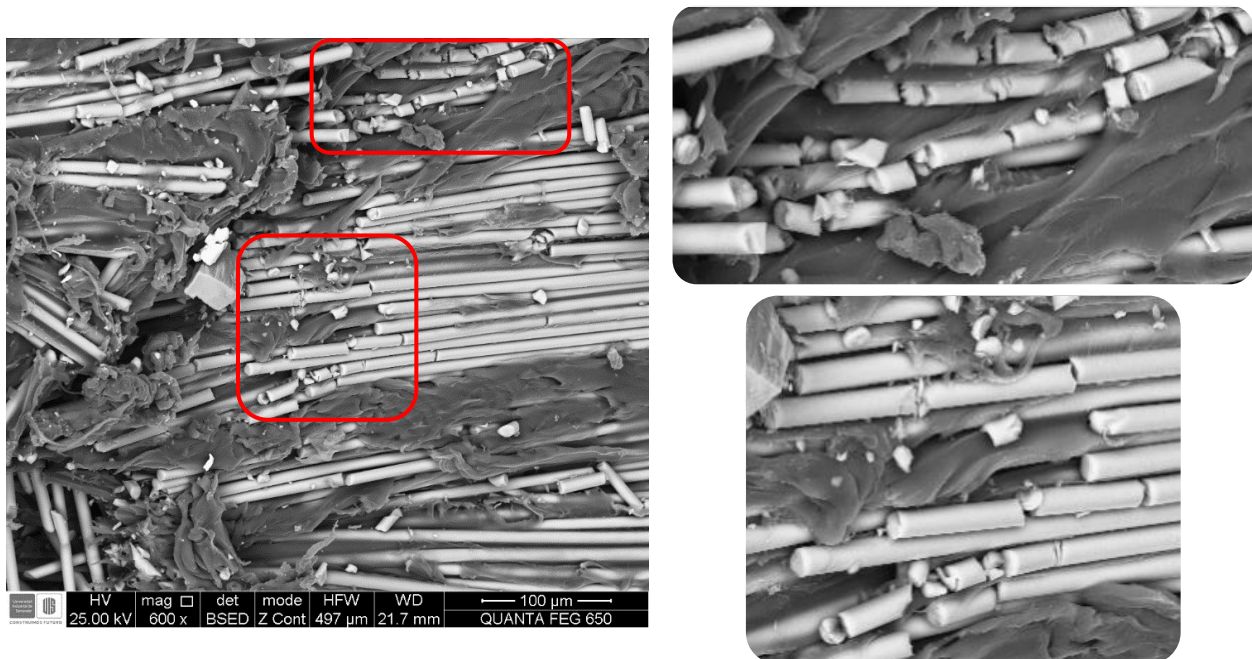


Figura 16. Múltiples fracturas en las fibras de vidrio dislocadas hacia diferentes direcciones.

Es posible observar algunos pequeños fragmentos de fibra en la Figura 17a), este tipo de característica es específico de las fallas por cortante, lo que sustenta la hipótesis que la propagación irregular de la fractura y además los múltiples modos de falla encontrados en ésta, suceden debido a las capas de fibras que son estrelladas durante la prueba (Opelt, Paiva, Cândido, & Rezende, 2017). Los fragmentos quedan desorientados a lo largo de la zona de falla, impidiendo una fácil identificación de la dirección hacia donde se propaga la fractura. En la Figura 17b), se presenta claramente el propósito de la matriz, que se adhiere a las fibras para mejorar sus características mecánicas, en este caso se observa un filamento que al fracturarse queda suspendido y sujetado por el nylon.

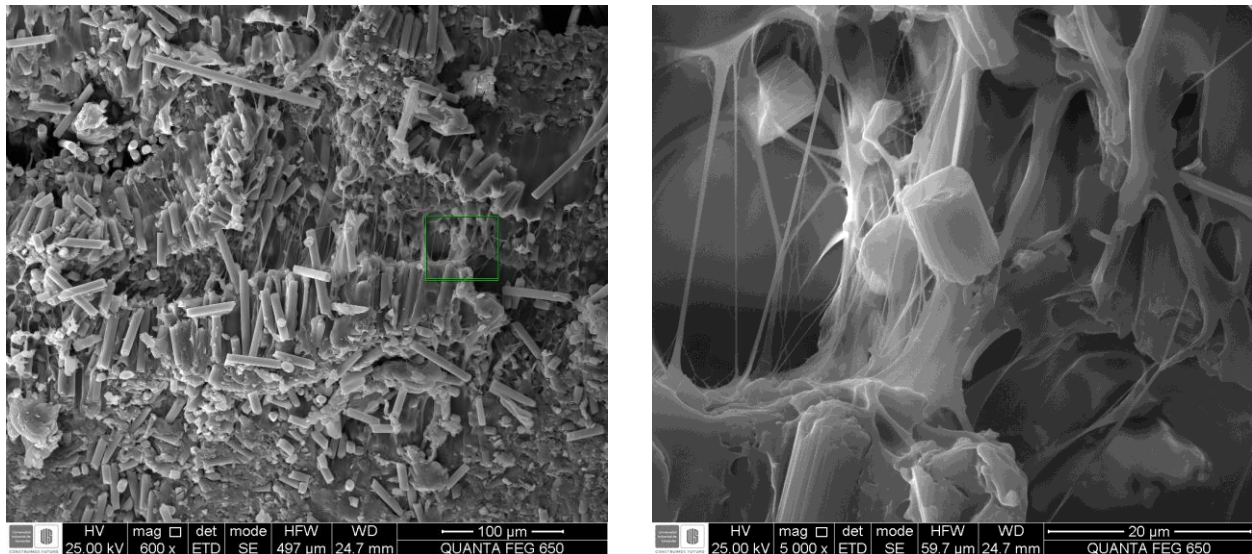


Figura 17. a) Filamentos de fibra de carbono fracturados y desorientados. b) Trozo de un filamento de fibra de carbono sujetado por la matriz de nylon.

## 5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación, indican que el modo de falla evidenciado por cada espécimen puesto a prueba, está ligado principalmente al material de refuerzo, además, la cantidad de fibras del mismo tiene mayor relevancia cuando se estudia el esfuerzo máximo a compresión y el ángulo de impresión con respecto a la sollicitación mecánica del material tiene mayor influencia cuando se realiza el análisis del módulo de elasticidad.

De los resultados obtenidos se concluye que, para encontrar las características más resistentes, bajo los parámetros propuestos de impresión, se tiene que priorizar la orientación de las fibras del material de refuerzo y las capas que se van a añadir ya que entre más fibras tenga el material y más paralelo se encuentre al eje de sollicitación de la carga, se va a obtener un material frágil y altamente resistente, especialmente si se trabaja con fibra de carbono.

Mediante el análisis de microscopía SEM, se logró identificar los diferentes tipos de falla que presentan los compuestos a compresión, donde se encontraron micro pandeos, falla comúnmente hallada bajo compresión, pero, donde se evidencia que la fractura se propaga principalmente por efecto del cortante o “Shear”, confirmando la alta resistencia de la fibra de carbono.

Las probetas impresas a 0 grados presentaron buenos resultados para el módulo de elasticidad, aunque el esfuerzo máximo a compresión se redujo por la ruptura de fibras fuera de la zona de ensayo lo que debilitó la misma, por lo tanto, se concluye que la forma como se deposita el material en la impresión es la causante de esta falla como se muestra en la Figura 7 c).

El ensayo realizado con fibra de vidrio para un ángulo de 90 grados no se tuvo en cuenta en los resultados analizados, debido a que las fibras se encontraban perpendiculares al eje de sollicitación

mecánica, dando como resultado una falla por pandeo, la cual no es un modo aceptable en la norma tratada en esta investigación.

## 6. Recomendaciones

Para futuros trabajos de investigación, sería interesante realizar el ensayo de compresión con los mismos materiales, bajo otro montaje igualmente avalado por la ASTM y ceñido a la norma ASTM D6641, de tal manera que sea posible realizar una comparación y analizar las diferencias que se puedan o no presentar, así mismo profundizar y analizar con los demás parámetros que la impresora permite variar en busca de mejorar las características de los compuestos fabricados.

Con la información analizada en las demás investigaciones, se pueden plantear nuevos ensayos añadiendo las cuñas o “tabs”, que se adhieren a la probeta y que son de diferentes materiales, información indicada en la ASTM D3410, para estudiar la influencia de éstas bajo cargas a compresión, y realizar una respectiva comparación con los resultados obtenidos en esta tesis.

Es muy importante efectuar un montaje idóneo para la realización de las pruebas a compresión, basados en las normas existentes para estos ensayos, ya que la medición de fuerza y el modo de fallo presentado pueden verse verdaderamente alterados por las condiciones bajo las cuales se dé la prueba.

## Referencias bibliográficas

- Argon, a S. (1972). Fracture of composites. *Treatise on Materials Science and Technology vol.1/Treatise on Materials Science and Technology vol.1*, 79--114|xii+346. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-341801-2.50007-2>
- Arifin, A. A.; Wang, W. X., & Matsubara, T. (2016). Experimental investigation on the compression and crush responses of cross-ply laminates with 0° plies of unidirectionally arrayed chopped strand. *Composites Part B: Engineering*, 98, 182–193. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.032>
- ASTM International. (2003). D3410M - Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. *Annual Book of ASTM Standards, 15.03*(Reapproved 2008), 1–16. Obtenido de: <https://doi.org/10.1520/D3410>
- Beltrán Guarín, S. (2017). *Caracterizacion y prediccion de las propiedades a tension de componentes impresos en 3d con refuerzo de fibras*. Universidad Industrial de Santander.
- Carlsson, L. A.; Adams, D. F., & Pipes, R. B. (2013). Basic experimental characterization of polymer matrix composite materials. *Polymer Reviews*, 53(2), 277–302. Obtenido de: <https://doi.org/10.1080/15583724.2013.776588>
- CAO, J., LI, F.-G., MA, X.-K., & SUN, Z.-K. (2017). Tensile stress–strain behavior of metallic alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 27(11). Obtenido de: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60271-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60271-1)
- Chaudhuri, R. A., & Garala, H. J. (1995). Analytical/Experimental Evaluation of Hybrid

Commingled Carbon/Glass/Epoxy Thick-Section Composites under Compression. *Journal of Composite Materials*, 29(13), 1695–1718. Obtenido de:

<https://doi.org/10.1177/002199839502901302>

Davidson, P., & Waas, A. M. (2016). Mechanics of kinking in fiber-reinforced composites under compressive loading. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 21(6), 667–684. Obtenido de:

<https://doi.org/10.1177/1081286514535422>

Goh, G. D.; Dikshit, V.; Nagalingam, A. P.; Goh, G. L.; Agarwala, S.; Sing, S. L., ... Yeong, W.

Y. (2017). Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics. *Materials & Design*, 137, 79–89. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.021>

Hofer, K., & Rao, P. (1977). A New Static Compression Fixture for Advanced Composite

Materials BT - A New Static Compression Fixture for Advanced Composite Materials.

Jelf, P. M., & Fleck, N. A. (1992). Compression Failure Mechanisms in Unidirectional

Composites. *Journal of Composite Materials*, 26(18), 2706–2726. Obtenido de:

<https://doi.org/10.1177/002199839202601804>

Kyriakides, S.; Arseculeratne, R.; Perry, E. J.; & Liechti, K. M. (1995). On the compressive

failure of fiber reinforced composites. *International Journal of Solids and Structures*, 32(6–7), 689–738. Obtenido de: [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)00157-R](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)00157-R)

Leigh, S. J.; Bradley, R. J.; Pursell, C. P.; Billson, D. R., & Hutchins, D. A. (2012). A Simple,

Low-Cost Conductive Composite Material for 3D Printing of Electronic Sensors. *PLoS ONE*, 7(11). Obtenido de: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049365>

McHenry, E., & Stachurski, Z. H. (2003). Composite materials based on wood and nylon fibre.

*Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(2), 171–181. Obtenido de:

[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00211-7](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00211-7)

Odom, E. M., & Adams, D. F. (1990). Failure modes of unidirectional carbon/epoxy composite compression specimens. *Composites*, 21(4), 289–296. Obtenido de:

[https://doi.org/10.1016/0010-4361\(90\)90343-U](https://doi.org/10.1016/0010-4361(90)90343-U)

Opelt, C. V.; Paiva, J. M. F.; Cândido, G. M., & Rezende, M. C. (2017). A fractographic study on the effects of hygrothermal conditioning on carbon fiber/epoxy laminates submitted to axial compression. *Engineering Failure Analysis*, 79, 342–350. Obtenido de:

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.006>

Paiva, J. M.; F. De Mayer, S. & Rezende, M. C. (2005). Evaluation of mechanical properties of four different carbon/epoxy composites used in aeronautical field. *Materials Research*, 8(1), 91–97. Obtenido de: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000100016>

Schneider, C.; Kazemahvazi, S.; Åkermo, M., & Zenkert, D. (2013). Compression and tensile properties of self-reinforced poly(ethylene terephthalate)-composites. *Polymer Testing*, 32(2), 221–230. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2012.11.002>

Schubert, C.; Van Langeveld, M. C., & Donoso, L. A. (2014). Innovations in 3D printing: A 3D overview from optics to organs. *British Journal of Ophthalmology*, 98(2), 159–161. Obtenido de: <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2013-304446>

Torabizadeh, M. A. (2013). Progressive Failure Analysis of Glass/Epoxy Composites at Low Temperatures. In A. F. E.-Y. Mastai (Ed.) (p. Ch. 11). Rijeka: IntechOpen. Obtenido de: <https://doi.org/10.5772/55093>

Zhang, M.; Wang, X.; Li, W.; Yang, J., & Guan, Z. (2018). Compressive strength determined for ultrahigh modulus fiber reinforced composites by [90/0]nslaminates. *Composite Structures*, 191, 24–35. Obtenido de: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.033>