

**MODELADO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE MATERIALES COMPUESTOS  
REFORZADOS CON FIBRAS TEJIDAS DE FIQUE**

**FERNANDO ELÍAS BARROS BAQUERO**

**JEFFERSON MARTÍN GAMBOA DÁVILA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2018**

**MODELADO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE MATERIALES COMPUESTOS  
REFORZADOS CON FIBRAS TEJIDAS DE FIQUE**

**FERNANDO ELÍAS BARROS BAQUERO**

**JEFFERSON MARTÍN GAMBOA DÁVILA**

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

**Ingeniero Mecánico**

**DIRECTOR**

**OCTAVIO ANDRÉS GONZÁLEZ ESTRADA**

**Ingeniero Mecánico, PhD.**

**CODIRECTOR**

**GERMAN ADOLFO DÍAZ RAMÍREZ**

**Diseñador industrial, MSc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**BUCARAMANGA**

**2018**

## **AGRADECIMIENTOS.**

Agradecemos especialmente al Sr Carlos Alberto Ríos Reyes, del Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander, al Sr Nicolás López, del Laboratorio de Ensayos Mecánicos, EIM, Universidad Industrial de Santander, Quienes dedicaron parte de su tiempo para el apoyo y colaboración de este estudio que hoy vemos terminado. Se agradece también el apoyo a través del proyecto Capital Semilla 1432 de la VIE, Universidad Industrial de Santander. A la Escuela de Ingeniería mecánica, Universidad Industrial de Santander, por su disposición y colaboración en la obtención de materiales para nuestro proyecto.

Damos también agradecimientos especiales a nuestro director Octavio Andrés González Estrada y a nuestro codirector Germán Adolfo Díaz Ramírez por su colaboración y disposición permanente en el proceso final de nuestro ciclo de estudio para optar al título de ingeniero mecánico.

## CONTENIDO.

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS.....	23
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
2. MARCO TEÓRICO .....	24
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	24
2.1.1 A nivel internacional.....	24
2.1.2 A nivel nacional.....	25
2.2 REFERENTES TEÓRICOS.....	26
2.2.1 Materiales Compuestos.....	27
2.2.2 Refuerzo (fibras).....	28
2.2.3 Matriz.....	31
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	33
3.1 MODELADO GEOMETRICO.....	33
3.1.1 Arquitectura del tejido.....	33
3.1.2 Modelado del laminado unidireccional.....	34
3.1.3 Modelado del tejido 1 (T-1) .....	36
3.1.4 Modelado del tejido 2 (T-2) .....	37
3.2 MODELADO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES COMPUESTOS.....	38

4.	RESULTADOS.....	40
4.1	ANÁLISIS EXPERIMENTAL.....	40
4.1.1	Materiales.....	40
4.1.2	Ensayo de tracción.....	41
4.1.3	Ensayo de flexión.....	45
4.1.4	Microscopía.....	49
4.2	MODELO FEM.....	54
4.2.1	Modelo elástico para unidireccionales.....	55
4.2.2	Validación del modelo FEM.....	57
4.2.3	Resultados FEM.....	57
5.	CONCLUSIONES.....	62
	BIBLIOGRAFÍA.....	64

## LISTA DE TABLAS.

	Pág.
Tabla 1. Configuraciones de las fibras.....	30
Tabla 2. Datos de entrada del hilo para modelado del laminado .....	35
Tabla 3. Resultados de los ensayos de Tracción.....	44
Tabla 4. Resultados de los ensayos de Flexión.....	48
Tabla 5. Resultados del modelo elástico para unidireccionales.....	56
Tabla 6. Error modelo elástico vs experimental .....	56
Tabla 7. Ajuste del Modelo FEM.....	57

## **LISTA DE ANEXOS**

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Anexo A. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (ASTM D3039).

Anexo B. Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (ASTM D790)

Anexo C. Artículo de investigación.

## LISTA DE FIGURAS.

	Pág.
Figura 1. Interfase de un material compuesto.....	28
Figura 2. esquema de un polímero reforzado con fibras.....	29
Figura 3. Ejemplos de fibras tejidas bidireccionales. ....	31
Figura 4. Modelo geométrico del laminado de 4 hilos.....	35
Figura 5. Modelo geométrico de T-1 .....	36
Figura 6. Modelo geométrico de T-2.....	37
Figura 7. Muestras para el ensayo de tracción. ....	42
Figura 8. Gráfica Esfuerzo vs Deformación. Solo Resina y unidireccionales.....	43
Figura 9. Gráfica Esfuerzo vs Deformación, Resina + Tejido. ....	43
Figura 10. Resultados ensayo de tracción.....	44
Figura 11. Probetas para el ensayo de flexión.....	46
Figura 12. Gráfica de flexión, solo resina epóxica y unidireccionales. ....	47
Figura 13. Gráfica de flexión, Resina + Tejidos. ....	47
Figura 14. Resultados ensayo de flexión. ....	48

Figura 15. Resultados SEM, ensayos de tracción. ....	51
Figura 16. Resultados SEM, ensayos de flexión.....	53
Figura 17. Modelo voxelizado del material reforzado con fibras tejidas.....	55
Figura 18. Esfuerzo equivalente (Von Mises) en el tejido 1. ....	59
Figura 19. Máximo esfuerzo principal (eje x) en el tejido 1. ....	59
Figura 20. Máximo esfuerzo cortante en el tejido 1. ....	60
Figura 21. Esfuerzo equivalente (Von-Mises) en el tejido 2.....	60
Figura 22. Máximo esfuerzo principal (eje x) en el tejido 2. ....	61
Figura 23. Máximo esfuerzo cortante en el tejido 2. ....	61

## RESUMEN.

**TITULO:** MODELADO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS TEJIDAS DE FIQUE.\*

**AUTORES:** FERNANDO ELÍAS BARROS BAQUERO

JEFFERSON MARTÍN GAMBOA DAVILA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** fique, modelado numérico, TexGen, materiales compuestos, fibras naturales, ANSYS, elementos finitos, fibras tejidas.

### DESCRIPCIÓN:

En este trabajo se propuso el modelado numérico del comportamiento mecánico ante cargas de tracción de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales de fique en forma de textil tejido. Para lo cual se utilizó el método de los elementos finitos (MEF) buscando predecir el comportamiento del material. La configuración de los tejidos naturales se tomó de un modelo comercial y se validó mediante datos experimentales.

El modelado geométrico de los tejidos a comparar se realizó mediante un software especializado llamado TexGen. Luego de recreados los modelos se exportan para el análisis. Dentro del proceso experimental se realizaron ensayos de laboratorio de tracción y flexión, de acuerdo a las normas ASTM D3039 y ASTM D790 respectivamente, con el objetivo de determinar experimentalmente el comportamiento mecánico del material para obtener propiedades y compararlas con los resultados del modelo numérico. Para el estudio mediante el FEM se empleó el software Ansys y para el modelado del tejido se usó el software TexGen mencionado anteriormente. Inicialmente, se realizó un modelo del tejido definido por la arquitectura geométrica escogida, se le asignaron propiedades de acuerdo a sus materiales constituyentes y las relaciones fibra-matriz. Luego, se aplicaron cargas de tracción al modelo y se estudió su comportamiento mecánico. Una vez finalizado el análisis y pruebas experimentales se evidencia un incremento porcentual en el módulo de elasticidad de 66.8% para el tejido 1 y 58.7 % para el tejido 2 en prueba de tracción, esto debido al incremento en fracción de volumen de fibra. Del análisis mediante FEM se pudo observar que el material falla debido a que los esfuerzos que le llegan a la matriz superan el esfuerzo último de este material en la zona donde se cruza con los hilos transversales del tejido.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Ing. Mecánico, PhD. Octavio Andrés González Estrada. Codirector: Diseñador Industrial, MSc. German Adolfo Díaz Ramírez.

## ABSTRACT

**TITLE:** MODELADO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS CON FIBRAS TEJIDAS DE FIQUE.\*

**AUTHORS:** FERNANDO ELÍAS BARROS BAQUERO

JEFFERSON MARTIN GAMBOA DAVILA\*\*

**KEYWORDS:** fique, numerical model, TexGen, green composites, natural fibers, reinforcement, ANSYS, finite element modeller, woven fibers.

### **DESCRIPTION:**

In this work, the numerical modeling of the mechanical behavior for tensile loads of a polymer matrix composite material reinforced with natural fibers of woven fique was proposed. For which the method of finite elements (FEM) was used to predict the behavior of the material. The configuration of the woven fique was taken from a commercial model and validated by experimental data.

The geometric modeling of the weave to be compared was made using specialized software called TexGen. After recreating the models were exported for analysis. For the experimental process, tensile and bending laboratory tests were carried out, according to ASTM D3039 and ASTM D790 standards respectively, with the objective of experimentally determining the mechanical behavior of the material to obtain properties and comparing them with the results of the numerical model. FEM analysis was made by the Ansys software and the TexGen software mentioned above was used for tissue modeling. Initially, a model of the weave defined by the chosen geometric architecture was made, properties were assigned according to their constituent materials and fiber-matrix relationships. Then, tensile loads were applied to the model and its mechanical behavior was studied. Once the analysis and experimental tests are completed, a percentage increase in the modulus of elasticity of 66.8% for weave 1 and 58.7% for weave 2 in tensile test is evidenced, due to the increase in fiber volume fraction. From the analysis by FEM it was observed that the material fails because the efforts that reach the matrix exceed the maximum effort of this material in the area where it crosses with the transverse threads of the fabric.

---

\* Degree Work.

\*\* Physical-mechanical Engineering Faculty, School of Mechanical Engineering, Director: Mechanical Engineer, PhD. Octavio Andrés González Estrada. Co-Director: Industrial Designer, MSc. German Adolfo Díaz Ramírez.

## INTRODUCCIÓN.

Los materiales compuestos nacen como consecuencia de altos estándares de seguridad y calidad en los campos de la aeronáutica, materiales para construcciones civiles, el campo de la automotriz, procesos químicos, herramientas para equipamiento deportivo entre otros, debido a su gran potencial para reunir muy buenas propiedades mecánicas, fácil obtención de materia prima y prolongamiento de la vida útil de los sistemas en los que forman parte<sup>1</sup>.

Se entiende por material compuesto a todo material formado por dos o más componentes, de tal forma que las propiedades del material final sean superiores que las de cada componente por separado. Este tipo de materiales se componen de dos elementos principales, la fibra y la matriz. Cuando estos elementos se combinan de manera idónea se consigue que las propiedades del material resultante presente mejores propiedades que las de los elementos por separado. También se deben tener en cuenta otros componentes como las cargas y los aditivos que tienen influencia en los materiales compuestos dependiendo de la fabricación y aplicación<sup>2</sup>. Los materiales compuestos ofrecen un gran número de posibilidades para la ingeniería y el diseño. Para los materiales compuestos se pueden tener en cuenta diferentes tipos de fibras, de las cuales las orgánicas y las inorgánicas son las principales, y a su vez también se pueden usar diferentes tipos de matrices. Para el comportamiento de los materiales compuestos también hay que considerar diversos agentes, tales como el agente ambiental, químico, físico y

---

<sup>1</sup> MIRAVETE, Antonio. CATEJÓN, Luis. Materiales compuestos. En: Temes de disseny. Vol.; 20 (Feb, 2002); pp. 123-139

<sup>2</sup> MIRAVETE, Antonio. LARRODE, Emilio. Materiales compuestos 1. Barcelona: reverté, 2007. 884p.

mecánico. Xia et al<sup>3,4</sup> han desarrollado una forma unificada explícita de condiciones periódicas de fronteras y usadas para el análisis de RVE's mediante FEM para laminados unidireccionales y laminados con distintas orientaciones de ángulos, para predecir las propiedades elásticas de los materiales, en el trabajo se hace comparación con resultados experimentales y se encuentra que los resultados del método desarrollado se asemejan en gran medida a los datos experimentales. Wang et al<sup>5</sup> apuntan su trabajo al desarrollo de mayor precisión en el modelado de elementos finitos para materiales compuestos de tejidos entrelazados usados como refuerzos, en la investigación se emplean dos tipos de modelado de repetición de célula unitaria RUC's, el modelo micro para el estudio de propiedades de los hilos y el modelo meso para estudio de propiedades del tejido dando como resultado una muy buena concordancia con resultados obtenidos de la experimentación de las muestras.

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales han ganado una gran importancia en la actualidad gracias a que cada día se busca el desarrollo de nuevos materiales que sean amigables con el ambiente. Gracias a esto la investigación en este tipo de materiales se ha incrementado, y se han buscado diversos métodos

---

<sup>3</sup>ZIHUI, Xia. YUNFA, Zhang. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications. En: International journals of solids and structures. Vol.; 40, No 8 (Apr, 2003); pp. 1907-1921

<sup>4</sup> ZIHUI, Xia. CHUWEI, Zhou. QIAOLING, Yong. et al. On selection of repeated unit cell model and application of unified periodic boundary conditions in micro-mechanical analysis of composites. En: International journals of solids and structures. Vol. 43, No 2 (Mar, 2005); pp. 266-278

<sup>5</sup> WANG, X. F. WANG, X. W. ZHOU, G. M ZHOU, C. W. Multi-scale analyses of 3D woven composites based on periodicity boundary conditions. En: journal of composite materials. Vol.41, No 14 (Sep, 2007); pp. 1773-1788

para caracterizar el comportamiento y evaluar el desempeño mecánico <sup>6</sup>. Diversos estudios han demostrado que, con el uso de fibras naturales como la fibra de fique, el jute y el sisal, entre otros, en los materiales compuestos se pueden obtener buenas propiedades mecánicas, por lo tanto, este tipo de fibras pueden ser utilizadas como refuerzos <sup>7,8</sup>. Debido al bajo impacto ambiental, al bajo costo y al amplio rango de aplicaciones de los compuestos de fibras naturales ha habido un crecimiento exponencial en los estudios e innovaciones de estos compuestos, el interés se debe a las ventajas de estos materiales con respecto a otro tipo de materiales, además se han empleado recursos en la búsqueda de mejorar las propiedades, capacidades y aplicaciones de este tipo de materiales<sup>9</sup>.

Las fibras naturales amigables con el ambiente vienen siendo comúnmente usadas como refuerzo para distintos materiales, tales como el acero convencional en el concreto y se han venido usando como refuerzo de materiales para construcción en exteriores e interiores, han ganado gran popularidad gracias al bajo costo y las

---

<sup>6</sup> CONTRERAS, Maria. F. HORMAZA, Wilson. A. MARAÑÓN, A. Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. En; Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. Vol. 1, No 1 (Jul, 2009); pp. 57-67

<sup>7</sup> HIDALGO SALAZAR, Miguel. A. MUÑOZ, Mario. F. MINA, José. H. Influence of incorporation of natural fibers on the physical, mechanical, and thermal properties of composites LDPE-AL reinforces whit fique fibers. En; International journal of polymer science. Vol.; 2015 (Mar, 2015); p 8

<sup>8</sup> POSADA CORREA, J, JARAMILLO ZAPATA, L. VILLEGAS, P et al. Estudio comparativo de negro de humo y alúmina como cargas reforzantes en mezclas de caucho natural. En; uis ingenierías. Vol.13, No 2(2014); pp. 59-67

<sup>9</sup> PICKERING, K. L. ARUAN E, M. G. LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. En; composites part A: applied science and manufacturing. Vol.; 83 (Sep, 2015); pp. 98-112

propiedades mecánicas específicas favorables<sup>10</sup>. El desarrollo de los compuestos de fibras naturales está en aumento para un amplio rango de aplicaciones. Para una óptima fabricación de este tipo de materiales, un factor importante es la interfaz, lugar donde se lleva a cabo la adherencia entre la fibra natural y la matriz polimérica. Dado que la interfaz entre los elementos es la que determina las propiedades del material, hay que tener en cuenta la compatibilidad entre la fibra natural y la matriz, también se puede ayudar a mejorar esta compatibilidad con distintos mecanismos de adhesión interfacial que ayuden en la interfaz, dependiendo de las propiedades que se requieran mejorar<sup>11</sup>.

La disponibilidad de las fibras naturales y la fácil manufactura ha estimulado a los investigadores para estudiar la factibilidad de estas para ser usadas como refuerzos en diversas aplicaciones, tales como en la industria automotriz, en construcción, entre otras, y desarrollar métodos para que estas fibras puedan cumplir con los requerimientos para un óptimo desempeño en dichas aplicaciones<sup>12</sup>. Por otra parte, debido al aumento en la preocupación por los problemas ambientales y a la creciente necesidad de materiales poliméricos que se adapten más a las necesidades de la industria, se ha tenido que incurrir en los compuestos reforzados con fibras naturales que provengan de fuentes renovables y biodegradables<sup>13</sup>.

---

<sup>10</sup> LIBO, Yan. BOHUMIL, Kasal. LIANG, huang. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. En: Composites part B: Engineering. Vol.92 (Feb, 2016); pp. 94-132

<sup>11</sup> ZHOU, Yonghui. MIZI, Fan. LIHUI, Chen. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. En: Composites part B: Engineering. Vol.; 101 (Jun, 2016); pp. 31-45

<sup>12</sup> EMAD, Omrani. PRADEEP, Menezes. PRADEEP, Rohatgi. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. En: Engineering science and technology, an international journal. Vol. 19, No 2 (Oct, 2015); pp. 717-736

<sup>13</sup> LA MANTIA, F. P. MANTIA, M. Green composites: A brief review. En: Composites Part A: Applied science and manufacturing. Vol. 42, No 6 (Jan, 2011); pp. 579-588

Los materiales compuestos reforzados con fibras tejidas presentan una mejor alternativa para diversas aplicaciones, este tipo de material compuesto puede presentar una gran variedad de configuraciones dependiendo del tipo de tejido usado, de los cuales se destacan los 2D Laminados tejidos, 2D laminados trenzados, laminados de telas de punto, laminados pegados, tejidos de enclavamiento 3D, 3D trenzado, compuestos no tejidos 3D<sup>14</sup>. Para modelar estos tejidos se han desarrollado diferentes softwares los cuales facilitan el proceso de modelamiento de tejidos brindando una mayor exactitud en la forma de los hilos y en las propiedades de estos, un software de este tipo que se destaca es TexGen el cual se utilizará en el desarrollo de este trabajo<sup>15</sup>. Los compuestos tejidos se caracterizan por las diferentes estructuras jerárquicas, las cuales deberían representarse por un modelo de la geometría del tejido y el comportamiento mecánico. A pesar de que se han realizado un gran número de estudios e investigaciones de los compuestos tejidos no existe un modelo que cubra todas las estructuras típicas para el refuerzo tejido del material compuesto. El reto para crear un modelo que cubra todas las estructuras típicas es tomar la mayor ventaja posible del principio jerárquico del modelado textil, para de esta manera crear un modelo integral para los compuestos tejidos<sup>16</sup>. un modelo matemático de la geometría interna de telas tejidas en 2D y 3D pueden ser usado como una celda unitaria que sirve de base para un modelo meso-mecánico de materiales compuestos en un análisis de elementos finitos. Este modelo calcula la ubicación espacial para cada hilo en una repetición de tejidos para una estructura dada, la deformación y la trama

---

<sup>14</sup> COX, Brian. FLANAGAN Gerry. Handbook composites of analytical methods for textile. Philadephia, Pensilvania: NASA contractor report, 1997. 176p

<sup>15</sup> LIN, Hua. BROWN, Louise. P. LONG, A. Modelling and simulating textile structures using TexGen. En: Advanced materials research. Vol.; 331 (Sept, 2011); pp. 44-47

<sup>16</sup> GONZÁLEZ ESTRADA, Octavio. LEAL ENCISO, L. REYES HERRERA, J. D. Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos. En: uis ingenierías. Vol. 15, No 2 (Jun, 2016); pp. 105-116

de los hilos y los parámetros mecánicos<sup>17,18</sup>. Recientemente Dai y Cunningham<sup>19</sup> realizaron un detallado análisis numérico mediante el análisis de elementos finitos en el que se simula el comportamiento de progresión del daño en la elasticidad mediante la determinación de las propiedades mecánicas de los tejidos utilizados y en el que se concluye que para las arquitecturas de dichos tejidos, predijeron con gran exactitud el módulo de tracción y el esfuerzo en relación a los obtenidos experimentalmente, obteniéndose también un modelo de fallas similar al experimentado.

Anurag et al.<sup>20</sup> considera que la celda unitaria es un componente esencial para el modelado de textiles ya que permite alojar características del patrón de repeticiones en el tejido, es decir tanto la trama como la urdimbre poseen las mismas propiedades geométricas y asume que son del mismo material. La sección transversal de los hilos para este estudio se asume en forma elíptica debido a la compactación que sufren los hilos al momento de ser tejidos. Huan Lin et al.<sup>21</sup> investigan el comportamiento mecánico de la tela tejida bajo compresión utilizando el método de elementos finitos en conjunto con un mecanismo no lineal para el modelado de los hilos, en el cual se observó que dicho comportamiento está

---

<sup>17</sup> LOMOV, S. V. HUYSMANS, G. LUO, Y. et al. Textile composites: modelling strategies. Vol. 32, No 10 (2001); pp. 1379-1394

<sup>18</sup> LOMOV, S. V. GUSAKOV, A. V. HUYSMANS, G. et al. Textil geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. En: Composites science and technology. Vol. 60, No 11 (May, 2000); pp. 2083-2095

<sup>19</sup> DAI, S. CUNNINGHAM, P. R. Multi-scale damage modelling of 3D woven composites under uni-axial tension. En: Composites structure. Vol.; 142 (Feb, 2016); pp. 298-312

<sup>20</sup> DIXIT, Anurag. MALI, Harlal. MISRA, R. K. Unit cell model of woven fabric textile composite for multiscale analysis. En: Procedia engineering. Vol.; 68 (2013); pp. 352-358

<sup>21</sup> LIN, Hua. SHERBURN, Martin. CROOKSTON, Jonathan. Et al. Finite element modelling of fabric compression. Vol. 1, No 15008 (Mar, 2008); 17p.

gobernado por la rigidez de la sección transversal y el módulo de corte transversal-longitudinal también se deja en claro que el modelamiento del hilo se hizo como un cuerpo continuo y sólido incapaz de simular las deformaciones reales de un hilo.

El modelado a meso-escala de materiales compuestos tejidos resulta ser una importante herramienta para la homogenización de las propiedades mecánicas, el estudio de los campos de esfuerzo-deformación dentro de la celda unitaria, determinar las condiciones para el inicio de la falla y el desarrollo de la falla asociado con el deterioro de las propiedades mecánicas homogenizadas del material compuesto, además las predicciones de las características geométricas y las propiedades elásticas de los compuestos tejidos son propuestos en base a la celda unitaria<sup>22,23</sup>. Para la validación del modelo meso de elementos finitos se requiere el registro de los detalles del estado de deformación de cada hilo en el tejido<sup>24</sup>. Este registro debe hacerse usando mediciones de deformación de campo completo en la superficie de la muestra<sup>25,26</sup>. El modelado de elementos finitos debe pasar por etapas distintas, etapas para una correcta solución del modelo, primero debe

---

<sup>22</sup> MAHMOOD, Ansar. WANG, Xinwei. ZHOU, Chouwei. Modeling strategies of 3D woven composites: A review. En: Composites structures. Vol. 93, No 8 (Mar, 2001); pp. 1947-1963

<sup>23</sup> LOMOV, Stephan. IVANOV, Dmitry. VERPOEST, Ignaas. et al. Meso-FE modelling of textile composites: road map, data flow and algorithms. En: Composites science and technology. Vol. 67, No 9 (Oct, 2006)

<sup>24</sup> ABU BAKAR, Ilyani. KRAMER, Oliver. BORDAS, S et al. Optimization of elastic properties and weaving patterns of woven composites. En: Composites structures. Vol. 100 (Jan, 2013); pp. 575-591

<sup>25</sup> LOMOV, Stephan. IVANOV, Dmitry. MOLIMARD, Jerome. et al. Full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites. En: Composites part A: Applied science and manufacturing. Vol. 39, No 8 (Sep, 2007); pp. 1218-1231

<sup>26</sup> MONSERRAT, C. TUR, C. FUENMAYOR, F. Evaluación basada en el método del gradiente de las propiedades elásticas de tejidos humanos in vivo. En: Uis ingenierías. Vol. 16, No 1 (2017); pp. 15-22

convertir el modelo geométrico en un modelo físico, después se debe proceder a hacer el mallado del modelo, el siguiente paso es aplicar las condiciones de contorno periódicas y por último se soluciona el conjunto de modelos necesarios para calcular la matriz de rigidez homogenizada<sup>27</sup>.

En este trabajo se propone el modelado numérico del comportamiento mecánico de un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales de fique en forma de textil tejido, utilizando el método de los elementos finitos (FEM), para diferentes tipos de carga y tejidos. La configuración del tejido natural será tomada de modelos comerciales y sus propiedades mecánicas serán validadas mediante pruebas experimentales. Dentro de las investigaciones relacionadas a este tipo de materiales y configuración del tejido de refuerzo se encontró que<sup>28</sup> realizan estudios sobre el comportamiento del fique como fibra de refuerzo cuando es sometido a cargas de impacto, llegando a la conclusión de que la resistencia más elevada se obtiene cuando existe mayor cantidad de nodos o puntos de contactos entre fibras ya que ofrecen una mayor transmisión de esfuerzos entre las mismas.

En la sección 3 se hace referencia al modelado computacional, se muestra el modelado geométrico con la arquitectura de celdas unitarias de los textiles a comparar y los parámetros para el modelamiento. Luego se exponen las ecuaciones mediante las cuales llegamos a la determinación de las propiedades del material compuesto. Luego de creada la celda unitaria se siguió con el modelamiento por elementos finitos, aquí se explica la forma en cómo se exportan los datos desde la herramienta de creación del textil (TexGen) al programa donde se llevará a cabo el

---

<sup>27</sup> IVANOV, Dmitry. VERPOEST, I. et al. Homogenisation of a sheared unit cell of textile composites: FEA and approximate inclusion model. En: *Revue européenne des éléments finis*. Vol. 14, No 6-7 (Dec, 2005); pp. 709-728

<sup>28</sup> ENCISO, Jorge. ALDANA, Diego. Simulación de impacto a mallas de fibras de fique y guadua como refuerzo de un compuesto polimérico. En: *Revista colombiana de materiales*. Vol. 5 (2013); pp. 139-144

análisis por elementos finitos (ANSYS). Posteriormente se procede a determinar los comportamientos de los modelos sometidos a cargas de tracción y analizar las respuestas de dichos materiales y finalmente se presentan las comparaciones entre los modelos y se dan las conclusiones más relevantes.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Modelar el comportamiento de un material compuesto reforzado con fibra de fique en una matriz de resina termoestable mediante el uso de herramientas computacionales, y comparar con datos obtenidos experimentalmente.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar y construir las probetas del material compuesto con fibra de fique en matriz de resina termoestable para realizar ensayos de flexión y tracción.
- Definir el modelo de material que caracteriza la respuesta mecánica del material compuesto reforzado con fibra para usar con el método de los elementos finitos.
- Simular mediante elementos finitos la respuesta del material compuesto a cargas de tracción aplicadas para obtener los campos de tensión y deformación.
- Validar los modelos numéricos utilizando los datos obtenidos experimentalmente en los ensayos.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 ESTADO DEL ARTE

#### 2.1.1 A nivel internacional.

*Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz de resina poliéster*<sup>29</sup>.

Este artículo tiene como objetivo exponer los tipos de fallas que sufren las fibras de fique y el material compuesto cuando son sometidos a esfuerzos de tracción y flexión mostrando los tipos de fractura microscópica y macroscópicamente.

*Machinability of natural fiber reinforced composites: a review*<sup>30</sup>.

Este artículo tiene como objetivo estudiar el comportamiento de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales a los procesos de maquinado, el documento se enfoca en el taladrado de materiales compuestos, pero también trata los procesos de fresado y torneado.

*A review of recent developments in natural fiber composites and their mechanical performance*<sup>31</sup>.

---

<sup>29</sup> CONTRERAS. Op. cit, pp. 57-67

<sup>30</sup> MAHMOUD M., A. Nassar; RAMANATHAN, Arunachalam; KHALID I., Alzebdeh. Machinability of natural fiber reinforced composites: a review. {En línea}. {14 noviembre 2016}. Disponible en: (<http://link.springer.com/article/10.1023/B%3AJMSC.0000025841.67124.c3>)

<sup>31</sup> PICKERING. Op. cit, pp. 98-11

Este documento nos explica la importancia que hay en cada paso para el diseño de un material compuesto, así como también los factores que afectan las propiedades mecánicas en materiales compuestos con refuerzos de fibras naturales

*Natural fiber-mediated epoxy composites e A review*<sup>32</sup>.

En esta revisión se recopilan diferentes estudios que se han hecho sobre los materiales compuestos reforzados con fibras naturales, también se discute sobre la influencia de factores, tales como contenido de fibra, geometría de fibra, tamaño de la fibra, en las propiedades del material compuesto.

*State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world*<sup>33</sup>.

El objetivo de esta revisión bibliográfica es exponer el comportamiento tribológico de los compuestos reforzados con fibra naturales, y encontrar posibles aplicaciones en las que las propiedades tribológicas de estos materiales compuestos puedan ser útiles.

### **2.1.2 A nivel nacional.**

*Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial*<sup>34</sup>.

---

<sup>32</sup> MITTAL, V.; SAINI, R.; SINHA, S. Natural fiber-mediated epoxy composites e A review. {En línea}. {18 noviembre de 2016}. Disponible en: ([www.elsevier.com/locate/compositesb](http://www.elsevier.com/locate/compositesb)).

<sup>33</sup> MITTAL, V.; SAINI, R.; SINHA, S. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. {En línea}. {18 noviembre de 2016}. Disponible en: ([www.elsevier.com/locate/compositesb](http://www.elsevier.com/locate/compositesb)).

<sup>34</sup> MUÑOZ VELEZ, Mario Fernando; HIDALGO SALAZAR, Miguel Ángel; MINA HERNANDEZ, José Hermínsul. Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. {En

En este documento encontramos las demostraciones de como los procesos de tratamientos químicos o fisicoquímicos afectan las propiedades de las fibras de fique, exponiendo que las aplicaciones de estos disminuyen componentes de las fibras que puedan ser indeseables tales como la lignina y las hemicelulosas mostrándonos un balance de la capacidad de aguante de las fibras con y sin tratamientos.

*Ultrasonic determination of the elastic constants of epoxy-natural fiber composites*<sup>35</sup>.

En este artículo se plantea la aplicación de una técnica de ultrasonidos through-transmission para determinación de las constantes elásticas de un material compuesto reforzado con fibra de fique y de un material compuesto reforzado con fibra de coco. Los resultados obtenidos experimentalmente concuerdan con los obtenidos mediante un modelo analítico.

*Simulación de impacto a mallas de fibras de fique y guadua como refuerzo de un compuesto polimérico*<sup>36</sup>.

Este documento se centra en analizar, mediante software (Solidworks), el comportamiento de un material compuesto de fibra de fique y guadua a cargas de impacto. En este artículo se evalúan las respuestas del material para diferentes tipos de tejidos.

## **2.2 REFERENTES TEÓRICOS.**

---

línea}. {18 noviembre de 2016}. Disponible en:  
([http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612014000200007&script=sci\\_arttext&tIng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612014000200007&script=sci_arttext&tIng=en))

<sup>35</sup> MEZA VALENCIA, C. A., et al. Ultrasonic determination of the elastic constants of epoxy-natural fiber composites. {En línea}. {18 noviembre de 2016}. Disponible en: ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)).

<sup>36</sup> ENCISO. Op. Cit, pp. 139-144

A continuación, se presentan los referentes teóricos que sostienen las bases para la adecuada comprensión conceptual del tema en del desarrollo del proyecto.

### **2.2.1 Materiales Compuestos.**

Se entiende por material compuesto a aquel formado por dos o más componentes, sin que haya reacción química entre ellos, de forma que las propiedades del material final sean superiores que las de los componentes por separado<sup>37</sup>.

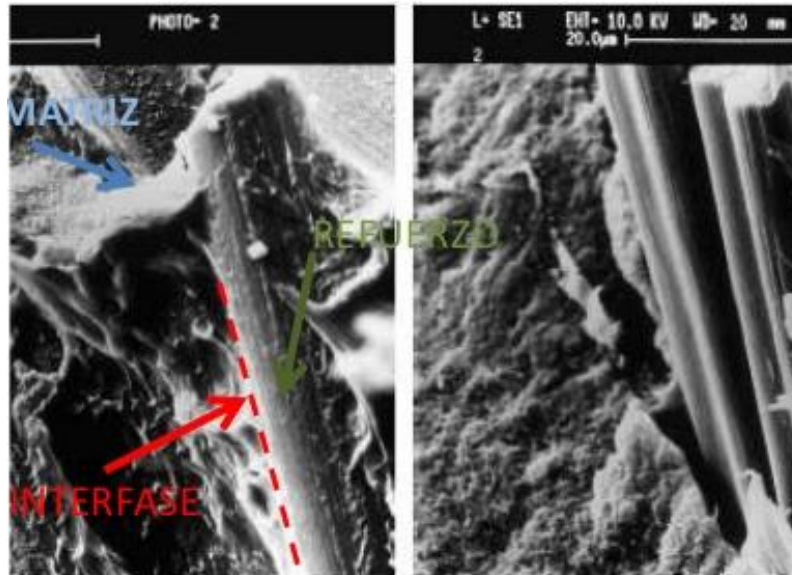
Estos materiales esencialmente poseen dos componentes principales, el refuerzo (fibra), en fase discontinua, que es el elemento resistente y la matriz que se presenta en fase continua y actúa como ligante<sup>38</sup>. Estas fibras pueden ser sintéticas o naturales y la matriz de resina se clasifica principalmente en matriz termoestable y matriz termoplástica.

---

<sup>37</sup> MIRAVETE. Op. cit, pp. 123-139

<sup>38</sup> POVEDA MARTINEZ, Santiago. Representación normalizada de piezas de material compuesto. {En línea}. {19 noviembre de 2016}. Disponible en: (<http://ocw.upm.es>)

Figura 1. Interfase de un material compuesto.



**Fuente:** <http://es.slideshare.net/gonzalomartinezbarre/interfase-de-materiales-compuestos>

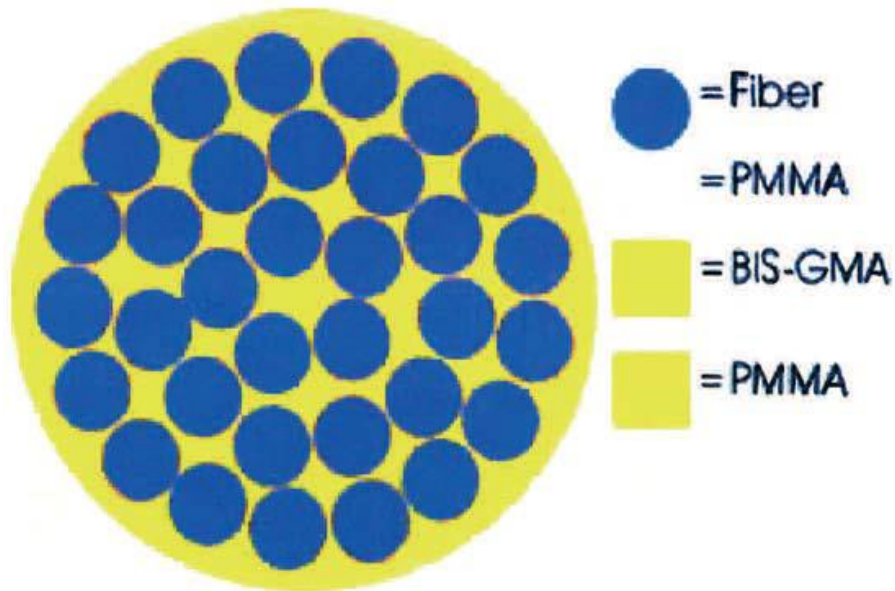
Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales han sido objeto de investigación en los últimos años, debido a sus buenas propiedades mecánicas. Con estos estudios se ha buscado una manera de reemplazar los materiales compuestos reforzados con fibras sintéticas, debido a que los materiales compuestos reforzados con fibras naturales son mucho más amigables con el ambiente y sus componentes son de muy bajo costo.

### 2.2.2 Refuerzo (fibras).

Las fibras son las responsables de las buenas propiedades estructurales del material compuesto. Sobre todo, logran que el material compuesto tenga unas

elevadas propiedades específicas de rigidez y resistencia en su dirección longitudinal<sup>39</sup>.

Figura 2. esquema de un polímero reforzado con fibras.



**Fuente:** TINO RAMOS, Rubén. *Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio.* {En línea}. {1 noviembre de 2016}. Disponible en: (<http://www.citop.es>)

Al material de refuerzo se les exige una serie de características, como son:

- buenas características mecánicas: alta rigidez y alta tracción.
- Estabilidad frente a agentes químicos.
- Estabilidad al desgaste.

---

<sup>39</sup> TINO RAMOS, Rubén. *Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio.* En: Cimbra. Vol. 46, No 390 (2010); pp. 42-52

- Compatibilidad química y de adherencia con la matriz polimérica.

El componente fibroso de refuerzo de estos materiales puede consistir en fibras continuas o en segmentos cortos. Si se utilizan fibras cortas, éstas deben ser de mayor diámetro. Se suelen utilizar fibras largas continuas para elaborar materiales destinados a estructuras de alto rendimiento<sup>14</sup>.

Las fibras pueden organizarse en diferentes configuraciones para cumplir requerimientos y mejorar propiedades, según el tipo de aplicación que se necesite.

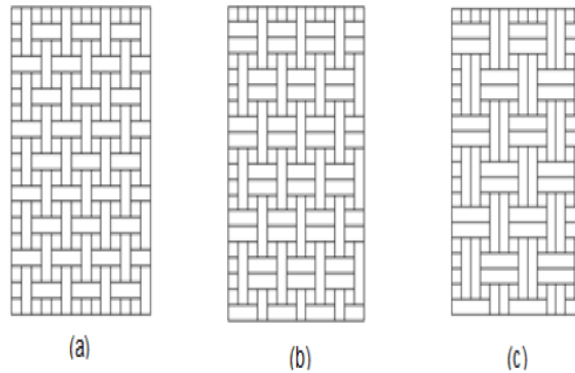
Tabla 1. Configuraciones de las fibras.

Tipo de fibra	Orientación
Fibra larga y continua	Fibra orientada unidireccional
	Fibra orientada bidireccional (tejido, cosido)
	Fibra orientada tridireccional (tejido 3D, cosido 3D)
	Orientación aleatoria (hilo continuo)
Fibra discontinua	Orientación aleatoria
	Orientación predominante
Partículas y <i>whiskers</i>	Orientación aleatoria
	Orientación predominante

**Fuente:** TINO RAMOS, Rubén. *Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio. {En línea}. {1 noviembre de 2016}. Disponible en: (<http://www.citop.es>)*

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron fibras tejidas bidireccionales.

Figura 3. Ejemplos de fibras tejidas bidireccionales.



**Fuente:** ENCISO, Jorge Luis; ALDANA A., Diego Alejandro. *Simulación de impacto a mallas de fibras de fique y guadua como refuerzo de un compuesto polimérico.* {En línea}. {18 noviembre de 2016}. Disponible en: (<http://aprendeonline.udea.edu.co>)

### 2.2.3 Matriz.

La matriz provee la forma del producto realizado con el material compuesto y la misión principal es garantizar la uniformidad de las deformaciones de las fibras y la redistribución de la carga cuando las fibras fallan.

La resistencia de la matriz toma importancia cuando la dirección del refuerzo no coincide con la orientación de la carga. El tipo y el material de la matriz definen el rango de temperatura a los cuales se puede someter el material compuesto.<sup>40</sup>

---

<sup>40</sup> CAR, E.; OLLER, S.; OÑATE, E. Tratamiento numérico de los materiales compuestos. {En línea}. {21 noviembre de 2016}. Disponible en: (<http://www.cimne.com/tiendaCIMNE/free/M57.pdf>)

### **2.2.3.1** Matriz termoplástica:

Son solubles en solventes apropiados y fusibles bajo determinadas condiciones de temperatura: nylon, polipropileno, policarbonato, polietileno y abs (acronitrilo-butadieno-estireno)<sup>1</sup>.

(a)

### **2.2.3.2** Matriz termoestable:

La matriz de polímeros termoestable posee baja viscosidad lo que posibilita una excelente impregnación de las fibras de refuerzo. Las resinas termoestables son normalmente isotrópicas, su principal característica es que una vez realizado el proceso de curado, no se funden de nuevo al calentarlas<sup>15</sup>.

### 3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se han modelado dos tipos de compuestos tejidos para hacer las respectivas comparaciones entre las propiedades mecánicas que brinden de acuerdo a sus entrelazamientos de urdimbre y trama. Las configuraciones geométricas de los tejidos de refuerzos son 2x1 y 20x26. Correspondiente a la familia de tejidos planos o en inglés plain weave.

#### 3.1 MODELADO GEOMETRICO

##### 3.1.1 Arquitectura del tejido

La estructura geométrica es un componente esencial en el modelado de tejidos ya que en este se representan las complejidades, propiedades físicas del tejido y además se incluyen propiedades mecánicas. El modelo para este trabajo se realizó mediante el uso del software TexGen<sup>41</sup>, herramienta desarrollada para el modelamiento de geometrías y estructuras de tejidos complejos, para los tejidos en cuestión se asumió que tanto el hilo como la matriz tienen comportamientos de cuerpos isotrópicos. La representación se muestra en las Figura 4 Figura 6. La Figura 4 corresponde a un ejemplo preliminar de un laminado unidireccional a 0 grados, la Figura 5 corresponde a la estructura del tejido 1 (2x1) y la Figura 6 corresponde al segundo tipo de tejido (20x26).

(b)

---

<sup>41</sup> SHERBURN, Martin. Geometric and Mechanical Modelling of Textiles. Nottingham, 2007, 272 p. Thesis (PhD). The University of Nottingham.

### 3.1.2 Modelado del laminado unidireccional.

Se planteó la elaboración del material con hilos longitudinales como refuerzo con objetivo de medir la precisión de los métodos a utilizar en la predicción de las propiedades mecánicas de los posteriores tejidos.

En la elaboración de este laminado se usó como fibra de refuerzo hilo de fique (1400) que se emplea en los tejidos y una resina epóxica cuyas propiedades fueron obtenidas luego de realizar pruebas experimentales y comparadas con datos existentes. Por tratarse de un laminado unidireccional se utilizó como base de cálculos teóricos de las propiedades mecánicas las ecuaciones dadas en la formulación de regla de mezclas:

$$E_1 = E_f * V_f + E_m * (1 - V_f) \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{E_f * E_m}{E_f * (1 - V_f) + E_m * V_f} \quad (2)$$

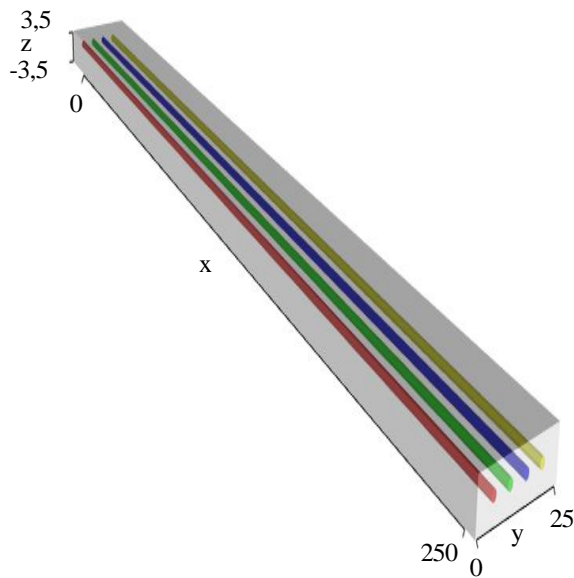
$$G_{12} = G_m * \frac{(G_f + G_m) + V_f * (G_f - G_m)}{(G_f + G_m) - V_f * (G_f - G_m)} \quad (3)$$

$$\nu_{12} = \nu_f * V_f + \nu_m * (1 - V_f) \quad (4)$$

$$\nu_{21} = \nu_{12} * \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

Un modelo del laminado realizado se muestra a continuación en la Figura 4.

Figura 4. Modelo geométrico del laminado de 4 hilos.



Las medidas del modelo geométrico presentado en la Figura 4 son de 250x25x7mm, y son las mismas para todos los modelos unidireccionales que se trabajaron. En la Tabla 1 se presentan los datos de las fibras de entrada al modelo.

Tabla 2. Datos de entrada del hilo para modelado del laminado

Parámetros	Medida	Unidades
Densidad lineal del hilo	0,0313	[gr/m]
Densidad de la fibra	0,720	[gr/cm <sup>3</sup> ]
Área total de la fibra	0,176	[mm <sup>2</sup> ]
Diámetro de la fibra	0,473	[mm]
Fibras por hilo	1	
Módulo de Young, $E$	22,06	[GPa]
Módulo de corte, $G$	8,824	[GPa]

---

Coeficiente de Poisson    0,25

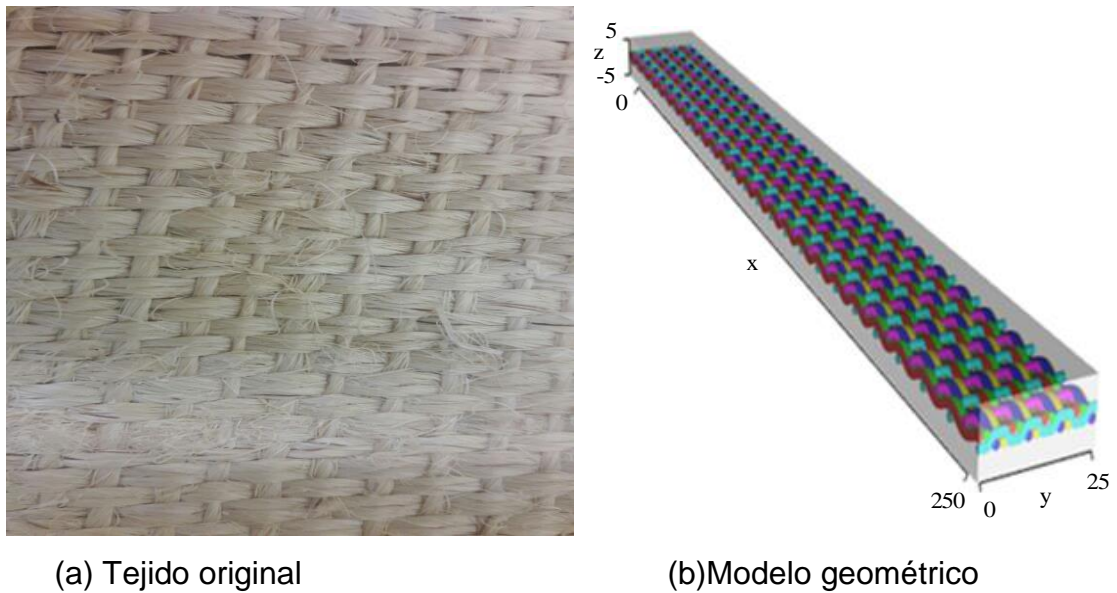
---

La resina se asume como un material isótropo homogéneo a la cual se le determinaron un Módulo de Young de 0,951 MPa, y un coeficiente de Poisson de 0,35.

### 3.1.3 Modelado del tejido 1 (T-1)

Como se mencionó anteriormente, el tejido 1 corresponde a la arquitectura 2x1, a continuación, en la Figura 5, es presentado en el tejido original con el respectivo modelo geométrico.

Figura 5. Modelo geométrico de T-1



(a) Tejido original

(b) Modelo geométrico

Las dimensiones del modelo son de 250x25x10mm, y el tejido consta de 2 hilos para la trama, y 4 hilos para la urdimbre, esto para la celda unitaria, El hilo es de

1,44mm de diámetro, La separación en la trama es de 5mm y en la urdimbre es de 2mm.

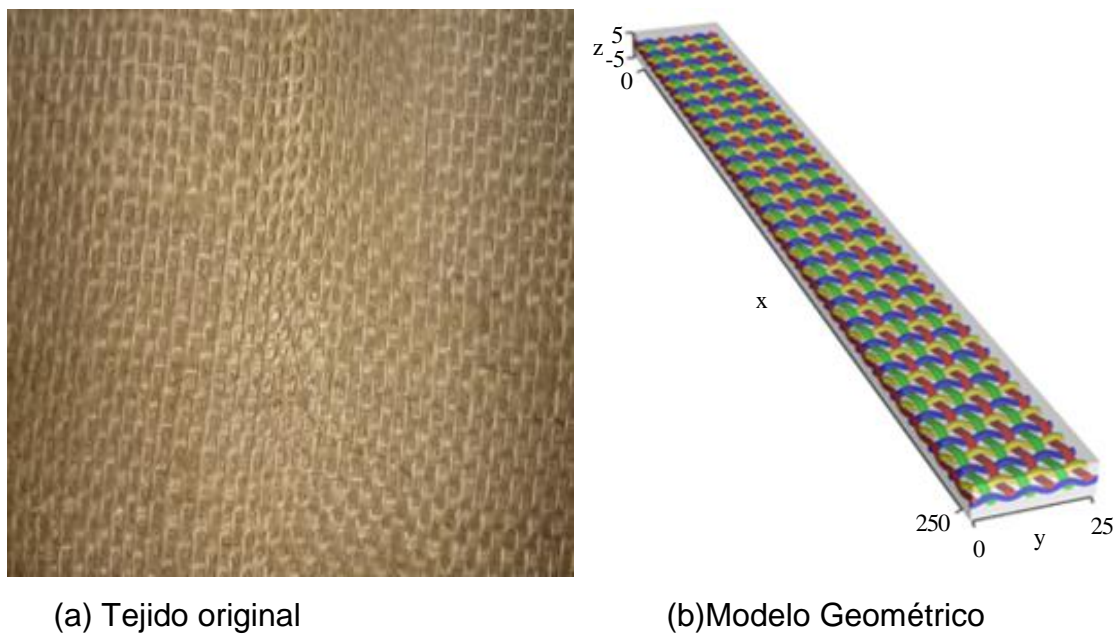
### 3.1.4 Modelado del tejido 2 (T-2)

El tejido 2 corresponde a una arquitectura 20x26, esto es, que en diez centímetros de longitud en la trama encontramos 20 hilos y en la urdimbre 26 hilos, en la Figura 6 se muestra el tejido original con su respectivo modelo geométrico.

Las dimensiones del modelo son de 250x25x10mm, y el tejido tiene en la trama y urdimbre 2 hilos, esto para la celda unitaria. El hilo es de 1,44mm de diámetro, La separación en la trama es de 5mm y en la urdimbre es de 3,85mm.

Dado que todos los tejidos son fabricados con el mismo hilo, las propiedades del hilo se muestran en la Tabla 2 para el tejido 1 y el tejido 2.

Figura 6. Modelo geométrico de T-2



### 3.2 MODELADO DE ELASTICIDAD PARA MATERIALES COMPUESTOS.

Se puede decir que el comportamiento mecánico de los materiales compuestos se caracteriza siempre a través de modelos elásticos que intentan predecir con la mayor precisión posible las respuestas que estos ofrecen cuando son sometidos a diferentes situaciones, pudiendo de esta manera denominarlos modelos predictivos, estos modelos se basan generalmente en las propiedades elásticas, plásticas y en el comportamiento de falla<sup>42</sup>.

Para problemas elásticos lineales tenemos los vectores de tensiones  $\sigma = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}\}^T$ , desplazamientos  $\mathbf{u}$  y deformaciones  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , definidos sobre un dominio  $\Omega$ . El objetivo es encontrar  $\mathbf{u}$  tal que cumpla lo siguiente:

$$\mathbf{L}^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \text{ en } \Omega \quad (6)$$

$$\mathbf{G} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{t} \text{ en } \Gamma_N \quad (7)$$

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} \text{ en } \Gamma_D \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) = \mathbf{L} \mathbf{u} \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \quad (10)$$

En donde  $\mathbf{L}$  es un operador diferencial,  $\mathbf{G}$  es un operador que proyecta las tensiones para el equilibrio en el contorno y  $\mathbf{C}$  es la matriz con la elasticidad del material.

Expresando el problema anterior en su forma variacional se escribe: Encontrar  $\mathbf{u} \in \mathbf{V}$  tal que  $\forall \mathbf{v} \in \mathbf{V}$ :

---

<sup>42</sup> MAHMOOD. Op. cit, pp. 1947-1963

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \, d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{b} \, d\Omega + \int_{\Gamma_N} \mathbf{v}^T \mathbf{t} \, d\Gamma \quad (11)$$

Donde  $\mathbf{V} = \{\mathbf{v} | \mathbf{v} \in [H^1(\Omega)]^2, \mathbf{V}_\Gamma = \mathbf{0}\}^1$ .

Para el caso de los materiales compuestos, encontramos la ley de Hooke generalizada para materiales elásticos anisótropos que plantea una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación. La relación tensión deformación planteada en (10), en términos de la matriz de rigidez  $\mathbf{C}$  se puede expresar como<sup>43</sup>:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Donde las constantes  $C_{ij}$  se obtiene considerando las propiedades elásticas de la matriz y del material de refuerzo a partir de la teoría clásica de laminados.

---

<sup>43</sup> GONZÁLEZ ESTRADA. Op. Cit, pp. 105-116.

## 4. RESULTADOS.

### 4.1 ANÁLISIS EXPERIMENTAL

El material compuesto bajo investigación está formado por una sola capa del material de refuerzo en forma de tejido, embebido en una matriz epóxica R744, el material se hace mediante colocación manual y las fibras no contienen ningún tipo de tratamiento térmico o químico, se puede apreciar que al momento de adquirir el material de refuerzo, este presenta una sección transversal de forma elipsoidal lo que nos hace pensar que ha sufrido una pequeña compactación cuando era tejido, aumentando de esta forma la fracción de volumen de fibra y consecuentemente las propiedades mecánicas del refuerzo.

Con las pruebas a realizar se pretende determinar las propiedades elásticas del material tales como módulos de Young y porcentajes de deformación

#### 4.1.1 Materiales

La fibra de refuerzo utilizada para la elaboración de este proyecto es una fibra tipo vegetal denominada *furcraea andina*, perteneciente a la familia agavácea, conocida comúnmente con los nombres de agave, pita, maguey, cabuya, fique, mezcal, fue suministrada por Coohilados del fonce LTDA. Estas fibras fueron utilizadas sin ningún tipo de tratamiento fisicoquímico que pudieran mejorar sus propiedades mecánicas o generar algún tipo de alteración superficial, el fique utilizado tiene una resistencia máxima a la tracción de 780 [MPa], un módulo de Young aproximado de

22,06 [GPa] (medidos con una longitud de fibra de 250 mm) y una densidad de 0,72 gr/cm<sup>3</sup>.<sup>44</sup>

Aplicando estadística descriptiva se logró encontrar que el hilo empleado está formado de 29 fibras aproximadamente con diámetro aproximado de 0.016 [mm] y un diámetro aparente de hilo de 1,444 [mm]

#### **4.1.2 Ensayo de tracción**

La prueba a tracción es uno de los ensayos mecánicos de tensión-deformación más comunes, con este ensayo pueden ser determinadas varias propiedades mecánicas de nuestro interés como son: módulo de elasticidad y resistencia máxima a tracción, porcentajes de deformación entre otras.

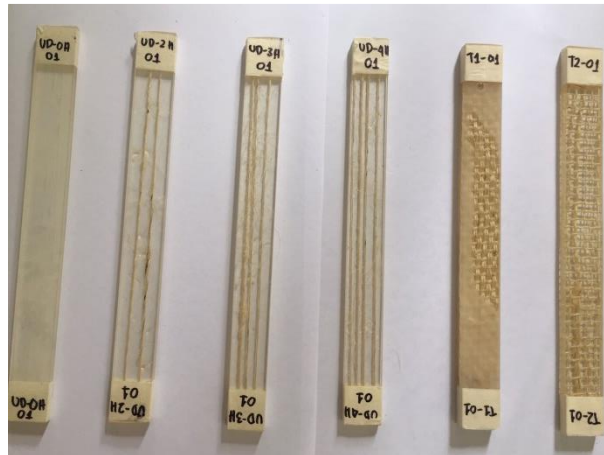
El ensayo se realizó en la máquina universal de ensayos MTS BIONIX y para la realización del ensayo se tuvieron en cuenta 3 tipos principales de probetas, unidireccional, tejido 1 y tejido 2. Para el ensayo de tracción del laminado unidireccional se aumentaba progresivamente la fracción de volumen de la fibra con el objeto de analizar el comportamiento del material a medida que aumentaba el refuerzo. El procedimiento y el tamaño de las muestras se hicieron según la norma ASTM D3039, las probetas fabricadas tienen una longitud de  $194,167 \pm 5,289$  mm, la altitud es de  $7,811 \pm 1,323$  mm y el ancho es de  $25,184 \pm 0,572$  mm.

Las probetas fabricadas para el ensayo de tracción se muestran en la Figura 7

---

<sup>44</sup> CAMARGO MENDEZ, María. GARCÍA, Diego. Material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales para la fabricación de tenso-estructuras. Bucaramanga, 2017, 36p. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas

Figura 7. Muestras para el ensayo de tracción.



Una vez realizados los ensayos de tracción y con el correspondiente tratamiento de datos se obtuvieron las siguientes graficas de cada probeta. En la Figura 8 se presentan la gráfica obtenida para las probetas de solo resina y las reforzadas por hilos unidireccionales y en la Figura 9 se presentan las gráficas obtenidas de las resinas reforzadas con las fibras de fique tejidas.

Además, para evidenciar el efecto de los hilos en las probetas, se presentan todas las gráficas obtenidas en la Figura 10.

Figura 8. Gráfica Esfuerzo vs Deformación. Solo Resina y unidireccionales.

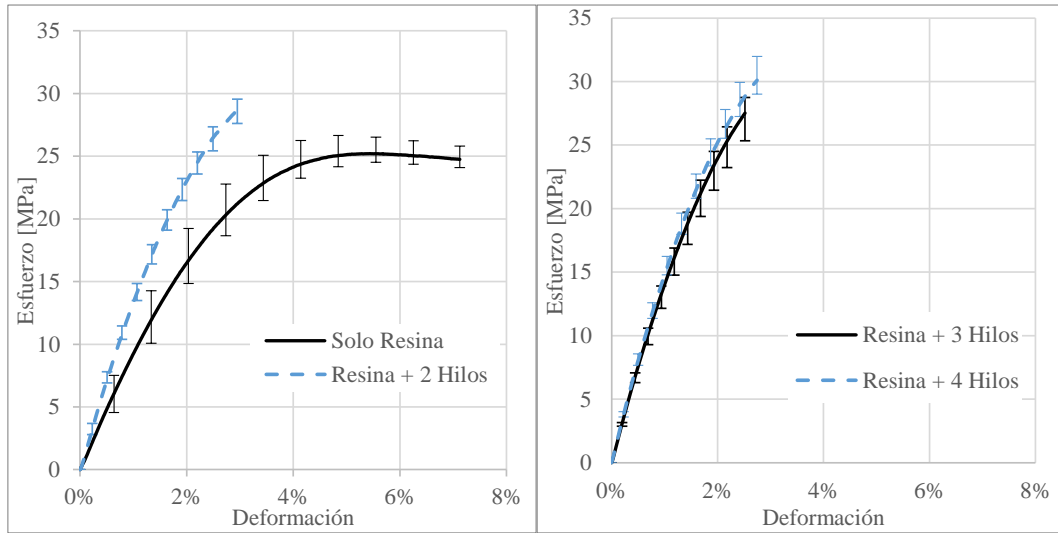


Figura 9. Gráfica Esfuerzo vs Deformación, Resina + Tejido.

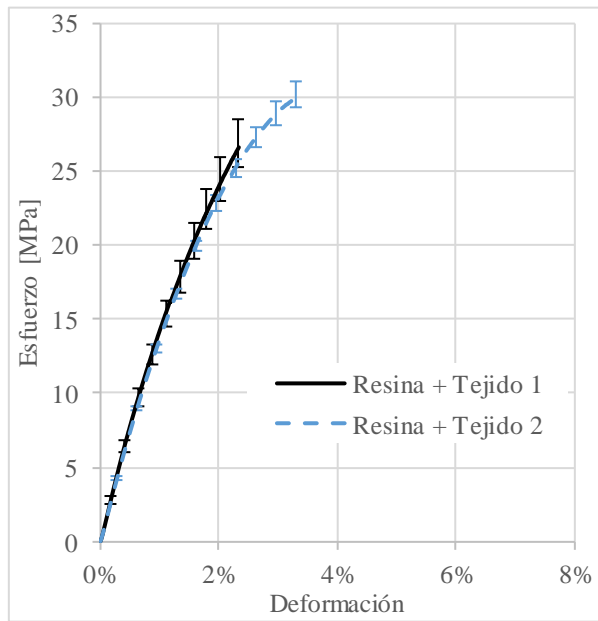
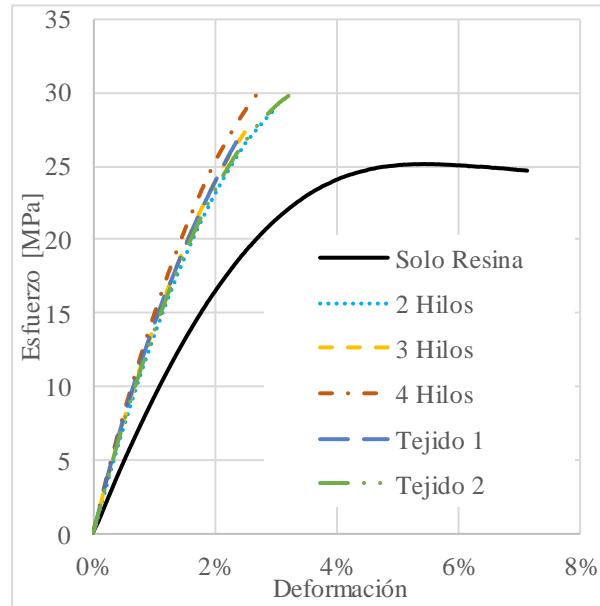


Figura 10. Resultados ensayo de tracción.



Con los datos obtenidos, se procedió a calcular el módulo de Young (E) para cada material, los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de Tracción

Tipo	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\% \epsilon_{\max}$ [mm/mm]	E [GPa]
Solo resina epóxica	$25,237 \pm 1,218$	$7,470 \pm 0,316$	$0,951 \pm 2,044$
Unidireccional de 2 hilos	$28,803 \pm 1,135$	$2,975 \pm 0,022$	$1,417 \pm 1,440$
Unidireccional de 3 hilos	$28,137 \pm 2,517$	$2,617 \pm 0,126$	$1,528 \pm 0,727$
Unidireccional de 4 hilos	$30,477 \pm 1,518$	$2,783 \pm 0,015$	$1,658 \pm 1,181$

Tejido 1	28,150±1,603	2,938±1,438	1,587±0,797
Tejido 2	30,254±1,155	3,420±0,285	1,509±0,561

En la Tabla 3 y Figura 10 se puede evidenciar el efecto del refuerzo en las propiedades del material, observándose que para las muestras de refuerzo unidireccional se aumenta el esfuerzo máximo y el módulo de Young (E) en función del número de hilos que contiene el refuerzo. Por el contrario, el porcentaje de deformación del material disminuye en función del número de hilos, lo cual es consistente con el comportamiento del material. Para las muestras con fibras tejidas de refuerzo se observa que los módulos de Young (E) y los esfuerzos máximos aumentan, con respecto a las muestras de solo resina epóxica, y el porcentaje de deformación disminuye, esto corresponde con el comportamiento esperado para este tipo de refuerzo.

#### 4.1.3 Ensayo de flexión

Se realizó el ensayo de flexión en 3 puntos con el cual se obtienen las siguientes propiedades mecánicas del material: esfuerzo último a la flexión, módulo de Young, y deformación

Este ensayo, al igual que el de tracción se realizó en la maquina universal de ensayos MTS BIONIX, y este ensayo se realizó para la resina epóxica, unidireccional de 1 y 2 hilos, y para los tejidos 1 y 2. Se ensayaron 3 probetas de resina epóxica y unidireccionales, y 5 probetas para cada uno de los tejidos, tejido 1 y tejido 2. Los procedimientos y tamaño de las muestras de esta prueba se hicieron según la norma ASTM D790. Las probetas fabricadas para el ensayo de flexión se presentan en la Figura 11 y tienen una longitud de 120 mm, altitud de 7,808±0,418 mm y el ancho es de 8,974±0,488 mm.

Figura 11. Probetas para el ensayo de flexión.



Una vez realizados los ensayos, realizando el respectivo tratamiento de datos se obtuvieron los siguientes resultados, en la Figura 12 se presenta la gráfica de las muestras de solo resina epóxica y unidireccionales, en la Figura 13 se presentan las gráficas obtenidas de las muestras del tejido 1 y tejido 2 respectivamente, finalmente en la Figura 14 se presentan las gráficas de todos los tipos de muestras.

Figura 12. Gráfica de flexión, solo resina epóxica y unidireccionales.

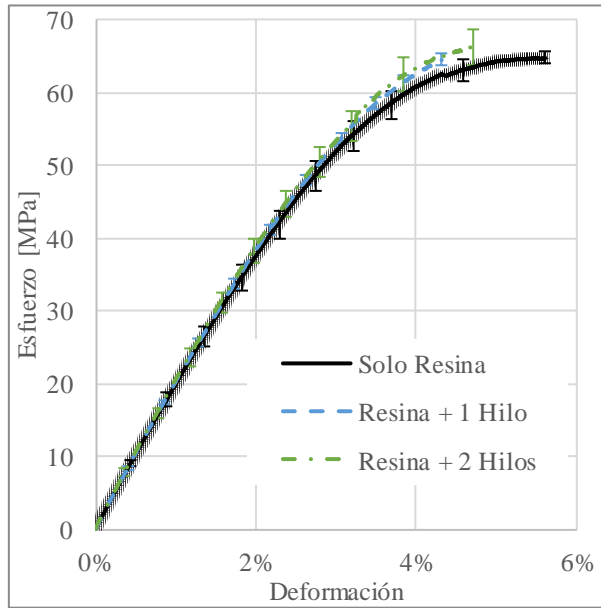


Figura 13. Gráfica de flexión, Resina + Tejidos.

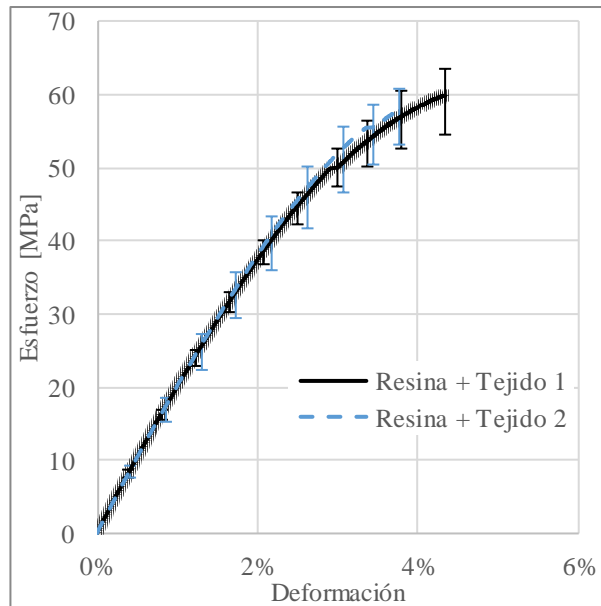
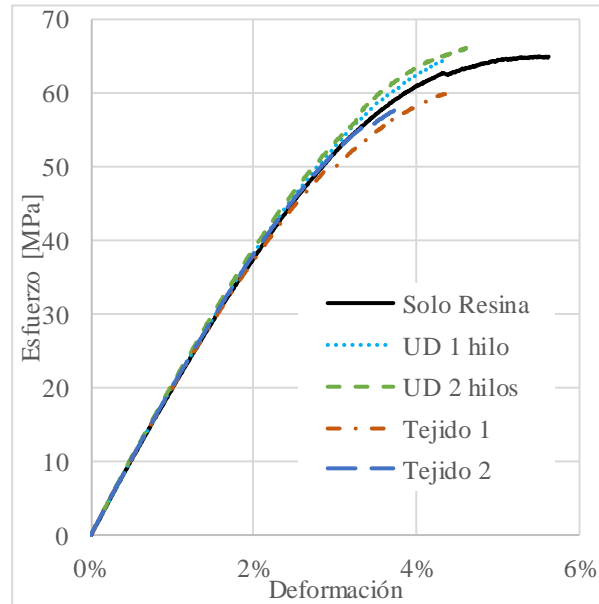


Figura 14. Resultados ensayo de flexión.



Una vez obtenidos los resultados, y con el procedimiento explicado en la norma se procedió a calcular los módulos de Young ( $E_f$ ) para cada material. Los resultados se presentan en la Tabla 4

Tabla 4. Resultados de los ensayos de Flexión

Tipo	$\sigma_{f_{max}}$ [MPa]	$\% \epsilon_{f_{max}}$ [mm/mm]	$E_f$ [GPa]
Solo resina epóxica	$64,236 \pm 1,421$	$5,154 \pm 0,799$	$2,026 \pm 0,087$
Unidireccional de 1 hilos	$59,321 \pm 6,420$	$3,712 \pm 0,772$	$2,046 \pm 0,015$
Unidireccional de 2 hilos	$56,666 \pm 13,530$	$3,778 \pm 1,322$	$2,067 \pm 0,048$
Tejido 1	$58,390 \pm 5,551$	$4,059 \pm 0,774$	$2,071 \pm 0,098$

Tejido 2	58,048±3,092	3,691±0,247	2,055±1,205
----------	--------------	-------------	-------------

Para el ensayo de flexión se puede evidenciar en la Tabla 4 y la Figura 14 que las propiedades del material compuesto varían en función del tipo de refuerzo, para los materiales con refuerzo unidireccional se observa en el módulo de Young un aumento en función del número de hilos. Para los materiales con refuerzo de fibras tejidas se observa aumento del módulo de Young, Por otra parte, se observa una disminución en el porcentaje de deformación, Todo esto es con respecto al material de solo resina epóxica.

#### 4.1.4 Microscopía

Se tomaron muestras mediante SEM, Scanning Electron Microscope, utilizando un Microscopio electrónico de barrido Quanta FEG (Fiel emission gun) 650, con un detector “Back Scattered Electron Detector (BSED)”, tipo SSD (estado sólido). Con el fin de observar el modo de falla del material, en estas imágenes se busca evidencia de separaciones entre la fibra y la matriz. Además, se busca analizar el tipo de fallo de las fibras, buscándose un fallo homogéneo de estas, para que las propiedades del material sean óptimas.

En la Figura 15 se puede observar que el modo de la falla para los materiales sometidos a las pruebas de tracción es el esperado, dado que se cortan todas las fibras de manera transversal, con una extracción mínima de la fibra, esto indica una buena adhesión entre la fibra y la matriz, lo cual mejora las propiedades del material<sup>45</sup>. Además, no se observa porosidad en la matriz, y se puede ver que la impregnación de la matriz entre las fibras de los hilos de los tejidos es óptima, lo

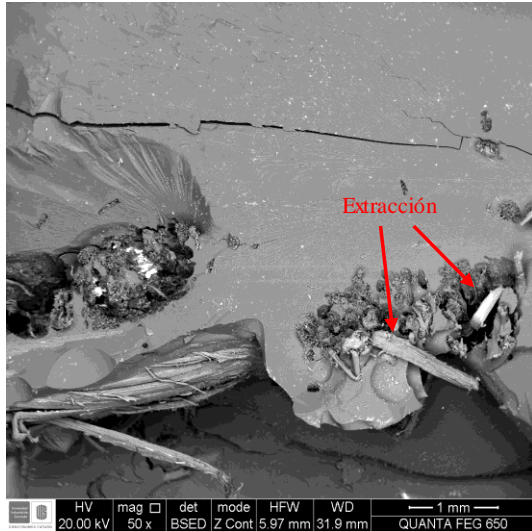
<sup>45</sup> CONTRERAS. Op. Cit, pp. 57-67.

cual indica un apropiado proceso de colado y curado del material<sup>46</sup>. Una posible razón para la extracción evidenciada es la falta de tratamientos de preparación de las fibras, que se usan para desprender las capas de hemicelulosa y lignina de su superficie, con el fin de mejorar la adhesión entre fibra y matriz.

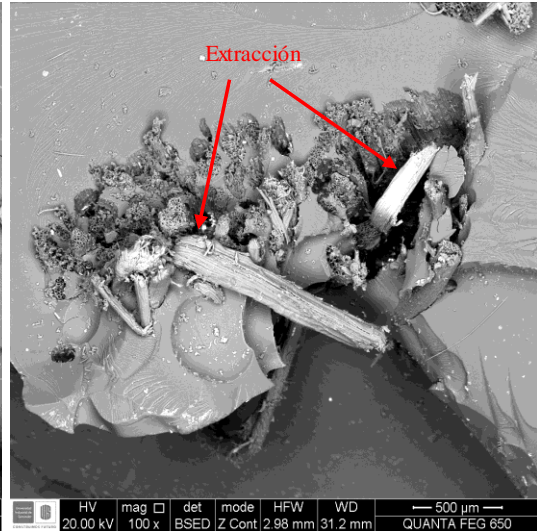
---

<sup>46</sup> LOZANO, Cristian. Deformación y fractura de una resina epóxica reforzada con fibra de algodón. Bogota, 2016,162p. trabajo de grado para optar al título de magister en materiales y procesos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica.

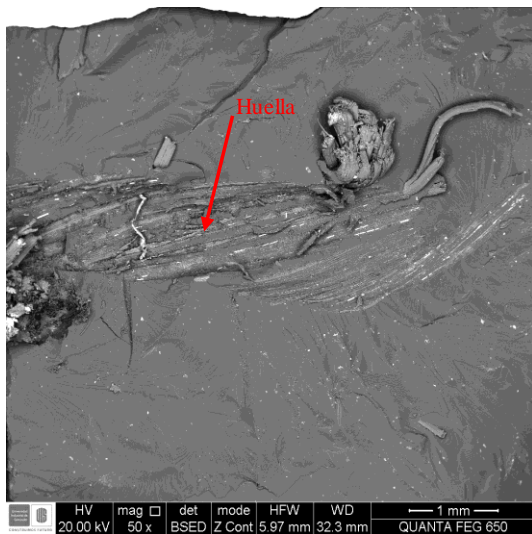
Figura 15. Resultados SEM, ensayos de tracción.



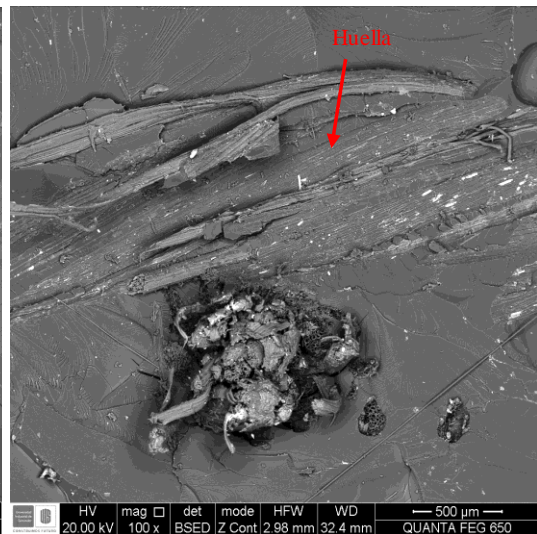
(a) Tejido 1 Tracción



(b) Tejido 1 Tracción



(c) Tejido 2 Tracción



(d) Tejido 2 Tracción

**Fuente.** Carlos Alberto Ríos Reyes. Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander.

En las Figura 15a y 15b se puede observar que en el material reforzado con el tejido 1 la falla tiene una pequeña extracción de fibra, y se observan unas pequeñas huellas, los cuales son consistentes con la extracción experimentada por las fibras. A pesar de esta mínima extracción se puede observar que el material falló de manera uniforme, se observa poca evidencia de delaminación<sup>47</sup>, entendida como el proceso de separación entre el refuerzo y la matriz que lo contiene.

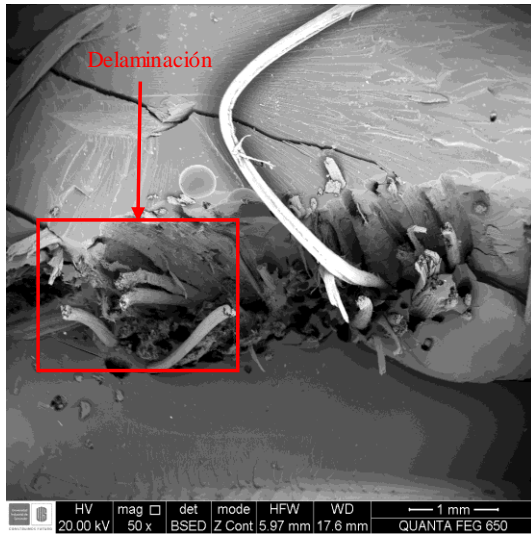
En la Figura 15c y Figura 15d se puede observar el material reforzado con el tejido 2, en estas imágenes se hacen evidentes huellas dado que la falla coincidió con un hilo de la trama del tejido. En las fibras transversales se evidencia una extracción mayor a la observada en la Figura 15a y Figura 15b, sin embargo, también se cortan trasversalmente. Es decir, que al igual que para el material reforzado con el tejido 1 la falla de la fibra es homogénea<sup>48</sup>, con poca evidencia de delaminación. Este comportamiento es consistente con el resultado esperado de fallo uniforme del material.

---

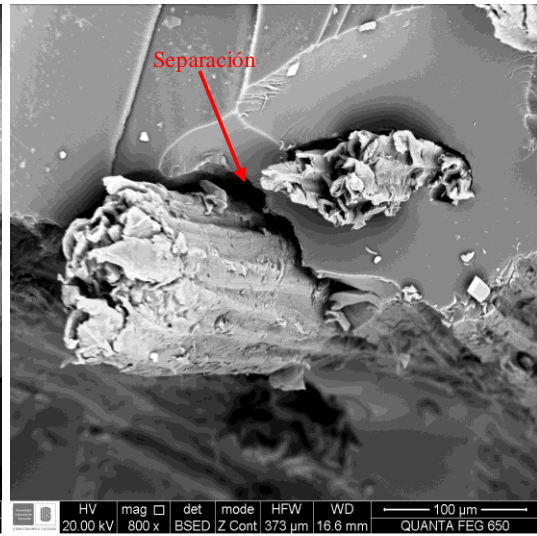
<sup>47</sup> MONTEIRO, S. N. LOPES, F. P BARBOSA, A. P. et al. Natural lignocellulosic fibers as engineering material-An overview. En: Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. Vol. 42, No 10 (2011); pp. 2963-2974

<sup>48</sup> HUGHES, Mark , CARPENTER, James y HILL Callum. Deformation and fracture behaviour of flax fibre reinforced thermosetting polymer matrix composites. En: Springer Science + Business media. Vol.;42. No. 7 (Mar 2007); pp. 2499–2511.

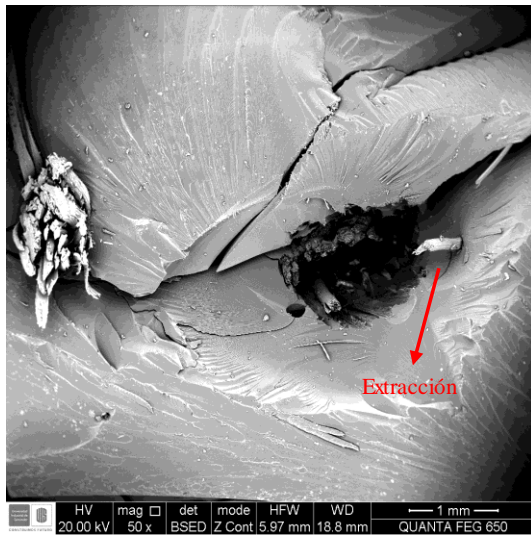
Figura 16. Resultados SEM, ensayos de flexión.



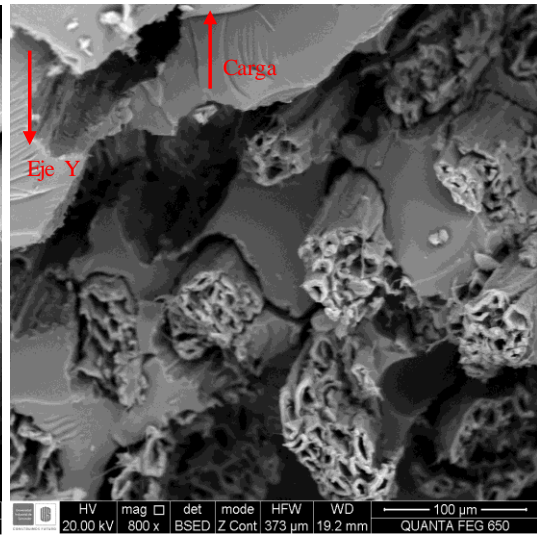
(a) Tejido 1 Flexión



(b) Tejido 1 Flexión



(c) Tejido 2 Flexión



(d) Tejido 2 Flexión

**Fuente.** Carlos Alberto Ríos Reyes. Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander.

Finalmente, En las muestras sometidas a flexión, Figura 16, se pueden evidenciar espacios de separación entre fibra y matriz, evidenciando su desprendimiento. En estas muestras se puede observar una mayor delaminación<sup>49</sup> y se evidencia que a medida que la distancia en el eje y aumenta con respecto a donde se aplicó la carga la extracción de las fibras aumenta, esto se presenta debido a la distribución de esfuerzos propia del ensayo de flexión. Sin embargo, El modo de falla en estas muestras también es el esperado, dado que las fibras se rompen homogéneamente y el material falla de manera uniforme.

## 4.2 MODELO FEM

La solución numérica de acuerdo con la formulación clásica de elementos finitos se obtiene a partir de la ley de Hooke:

$$Ku = F \quad (13)$$

Donde K representa la matriz global de rigidez del material, u representa los desplazamientos y F las fuerzas nodales.

$$K = \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \, d\Omega \quad (14)$$

$$F = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{b} \, d\Omega + \int_{\Gamma_N} \mathbf{v}^T \mathbf{t} \, d\Gamma \quad (15)$$

---

<sup>49</sup> MONTEIRO. Op. Cit, pp. 2963-2974

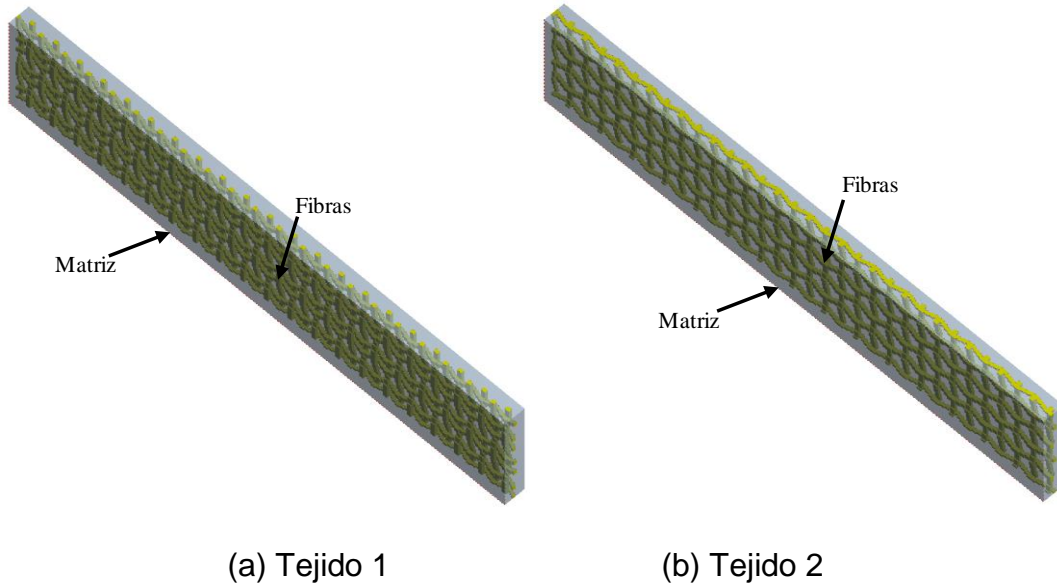
Formando de esta manera la ecuación

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \, d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{b} \, d\Omega + \int_{\Gamma_N} \mathbf{v}^T \mathbf{t} \, d\Gamma$$

mostrada anteriormente en la sección 2.2 ecuación (11)

El uso de un modelo geométrico de la arquitectura de refuerzo que esté lo más cerca posible a la de una muestra real se hace imprescindible para obtener un modelado preciso <sup>9</sup>. Para el modelo del comportamiento mecánico a tracción se trabajó con un mallado voxelizado, Figura 17, el cual se obtuvo mediante el software TexGen.

Figura 17. Modelo voxelizado del material reforzado con fibras tejidas.



#### 4.2.1 Modelo elástico para unidireccionales.

Para un análisis preliminar se planteó obtener mediante la regla de mezclas las propiedades elásticas esperadas para el material compuesto con el cual se está trabajando.

Tomando las ecuaciones (1) y (2) con  $E_f = 22060[\text{MPa}]$ ,  $E_m = 951[\text{MPa}]$  y teniendo en cuenta que  $V_f$  varía en función del número de hilos, se usa  $V_f = 0,01872$  para 2 hilos,  $V_f = 0,02807$  para 3 hilos y  $V_f = 0,03743$  para 4 hilos. Para la ecuación (3) se tuvo en cuenta que  $G_f = 8824[\text{MPa}]$  y  $G_m = 380,4 [\text{MPa}]$  Por último, para la ecuación (4) se usaron  $\nu_f = 0,25$  y  $\nu_m = 0,35$ .

Resolviendo el sistema de ecuaciones de 1 a 5, con los datos mencionados en el párrafo anterior se obtuvieron los resultados y se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados del modelo elástico para unidireccionales.

N° hilos	$E_1[\text{GPa}]$	$E_2[\text{GPa}]$	$G_{12}[\text{GPa}]$	$\nu_{12}$	$\nu_{21}$
2	1,346	0,968	0,394	0,348	0,250
3	1,544	0,977	0,401	0,347	0,220
4	1,741	0,986	0,408	0,346	0,196

**Fuente:** elaboración propia.

Con los datos presentados en la Tabla 5 se halla el error con respecto a los datos obtenidos experimentalmente, en los ensayos de tracción. El error hallado se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Error modelo elástico vs experimental

N° hilos	$E_1[\text{GPa}]$	$E_{\text{Exp}}[\text{GPa}]$	%error
2	1,346	1,417	5,011%
3	1,544	1,527	1,113%
4	1,741	1,657	5,069%

**Fuente:** elaboración propia.

#### 4.2.2 Validación del modelo FEM.

Con el fin de validar el modelo numérico, se aplicaron cargas de tracción al modelo de cada material y con estas se hallaron las propiedades elásticas de cada material, una vez se obtuvieron estos resultados se compararon con los obtenidos experimentalmente.

Los datos de las propiedades elásticas obtenidos en el ajuste del modelo FEM y su respectivo porcentaje de error, con respecto a los obtenidos experimentalmente, se presentan en la

Tabla 7. Ajuste del Modelo FEM.

Tipo refuerzo	$E_{FEM}$ [GPa]	$E_{Exp}$ [GPa]	%error
Unidireccional de 2 hilos	1,376	1,417	2,893%
Unidireccional de 3 hilos	1,461	1,527	4,366%
Unidireccional de 4 hilos	1,629	1,657	1,690%
Tejido 1	1,693	1,587	6,679%
Tejido 2	1,457	1,509	3,446%

**Fuente:** elaboración propia.

#### 4.2.3 Resultados FEM.

Con el modelo geométrico voxelizado mostrado en la Figura 17 se procedió a aplicar una carga de 8000 [N] con el fin de obtener la distribución de esfuerzos para cada material. En la Figura 18-Figura 20 se presenta la distribución de esfuerzos

equivalente (Von Mises), máximo principal y máximo cortante para el tejido 1 respectivamente. Igualmente, para el tejido 2 se presentan los mismos esfuerzos en las Figura 21 -Figura 23. En estas figuras se puede observar la distribución para la malla del tejido de refuerzo y también para la matriz contenedora. Se puede observar que los hilos longitudinales del refuerzo son los que resisten la mayor parte de la carga, llegando a soportar esfuerzos de 664,05 MPa, mientras que los hilos transversales pueden llegar a soportar esfuerzos de compresión en la sección donde se cruzan con los hilos longitudinales. Por otro lado, para la resina se puede observar que el esfuerzo se concentra en los espacios entre los hilos longitudinales, buscando separar la matriz de los hilos transversales. Por lo cual podría esperarse, así como ocurrió en la Figura 15c y Figura 15d, que la falla del material ocurra en la sección donde se encuentra el hilo transversal. Teniendo en cuenta que la sección transversal del modelo tiene un área  $250\text{mm}^2$ , el esfuerzo nominal que soporta el material es de 32 MPa. Basándose en la Figura 19 y Figura 22, donde se muestran los esfuerzos principales en el eje x, se puede observar que la matriz soporta un promedio aproximado de 25MPa, es decir, 0,78 veces el esfuerzo nominal, pero también se puede observar que en la zona donde se concentran los esfuerzos puede llegar a soportar hasta 3,8 veces el esfuerzo nominal. Mientras que para las fibras se observa que alcanzan un esfuerzo de 663MPa, es decir, 20 veces el esfuerzo nominal. Basados en lo anterior se puede predecir que el material falla debido a que el esfuerzo que alcanza la matriz en la zona donde se concentran los esfuerzos superan el esfuerzo máximo que puede soportar este material.

Figura 18. Esfuerzo equivalente (Von Mises) en el tejido 1.

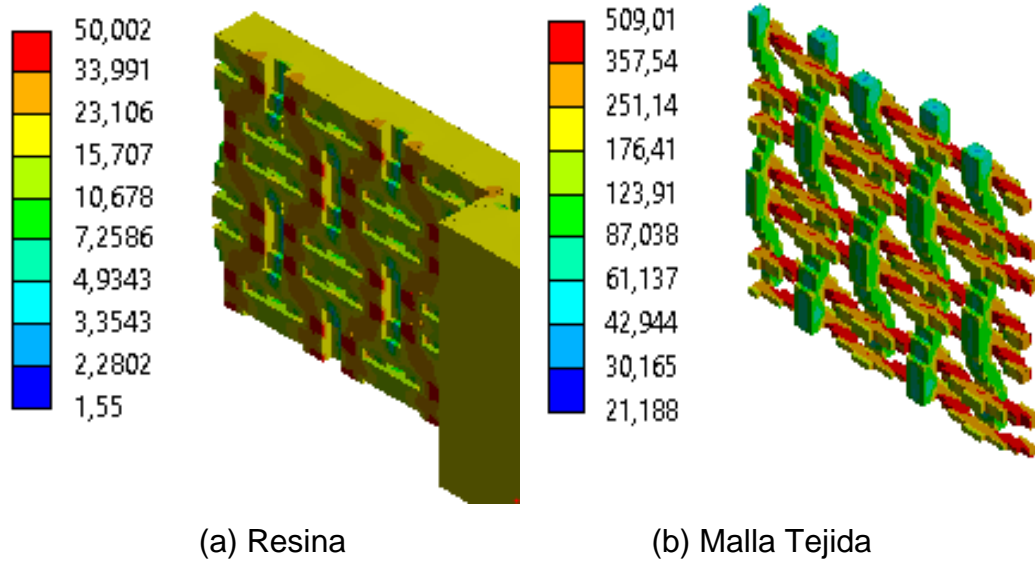


Figura 19. Máximo esfuerzo principal (eje x) en el tejido 1.

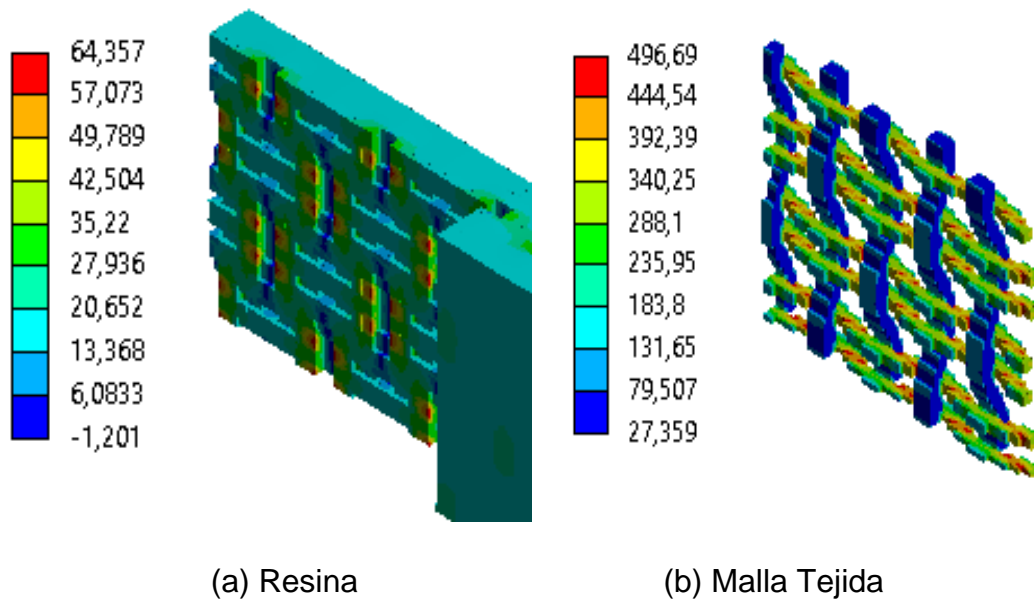


Figura 20. Máximo esfuerzo cortante en el tejido 1.

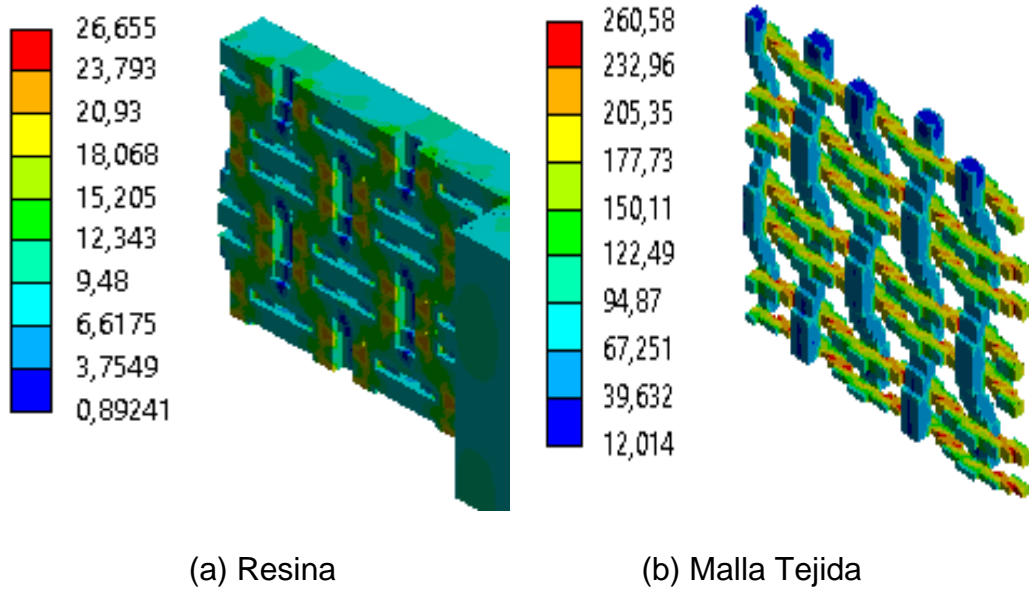


Figura 21. Esfuerzo equivalente (Von-Mises) en el tejido 2.

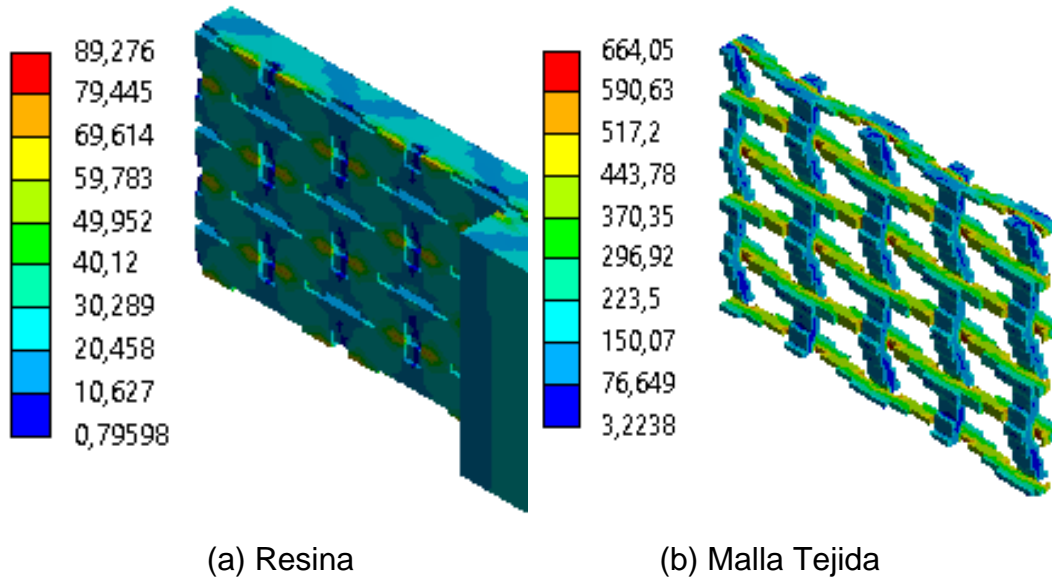


Figura 22. Máximo esfuerzo principal (eje x) en el tejido 2.

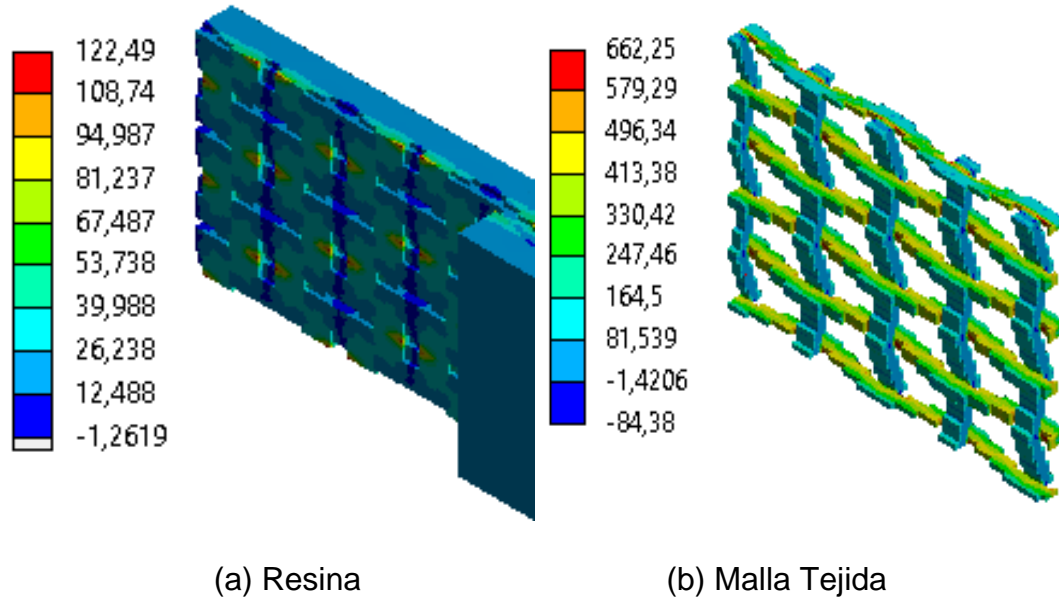
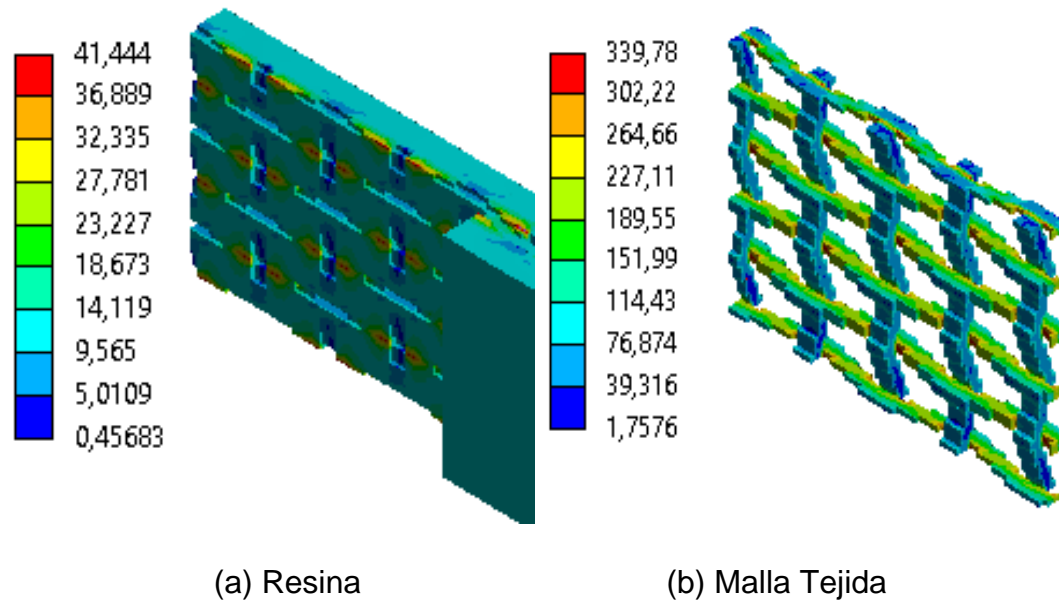


Figura 23. Máximo esfuerzo cortante en el tejido 2.



## 5. CONCLUSIONES

Se realizaron los ensayos de tracción y flexión según las normas ASTM D3039 y ASTM D790 respectivamente. De estos ensayos se obtuvieron graficas de esfuerzo vs deformación, y se hallaron módulos de elasticidad (módulo de Young), esfuerzo máximo y porcentaje de deformación para cada tipo de refuerzo y para cargas de tracción y flexión. Con los datos obtenidos se puede evidenciar la influencia del refuerzo en el material compuesto. Con estos resultados se puede evidenciar un aumento significativo para el módulo de Young, dado que para la tracción pasa de 0,951MPa de las muestras de solo resina, a 1,587 MPa para las muestras reforzadas con el tejido 1 y 1,509 MPa para las muestras reforzadas con el tejido 2. Esto equivale a un aumento del 66,8% y del 58,7% en esta propiedad respectivamente.

Para el modelo numérico se usó una malla voxelizada, la cual presentó una buena aproximación para las propiedades mecánicas del material. Mediante el modelo numérico es posible visualizar los componentes del material compuesto por separado, es decir, observar el comportamiento del material de refuerzo (unidireccional y tejido), y de la matriz contenedora.

Se aplicó una carga a tracción y se estudió la respuesta mecánica del material. Se representaron los esfuerzos máximos principales, esfuerzo equivalente de Von Mises, y máximo cortante. Se evidenció, como era esperado, que los esfuerzos de tracción son soportados por los hilos longitudinales de la malla tejida. Además, se dedujo que el material falla debido a que hay zonas que superan el esfuerzo que puede soportar la matriz, donde se concentran los esfuerzos y llegan a superar hasta 4 veces el esfuerzo ultimo a la tracción de la matriz, mientras que para las fibras no se alcanza a superar el esfuerzo máximo.

Los resultados numéricos presentaron diferencias bajas, menores al 6,8%, con respecto a los datos obtenidos experimentalmente para las propiedades mecánicas

del material. Esto indica que el modelo presenta una buena confiabilidad, y puede ser usado para el estudio de geometrías más complejas.

## BIBLIOGRAFÍA

ABU BAKAR, Ilyani. KRAMER, Oliver. BORDAS, S et al. Optimization of elastic properties and weaving patterns of woven composites. En: *Composites structures*. January, 2013, Vol. 100, p. 575-591

CAR, E. OLLER, S and OÑATE, E. Tratamiento numérico de los materiales compuestos [Monografía CIMNE], Barcelona, España. Vol. 57, p. 333, 2000.

CAMARGO MENDEZ, María y GARCÍA, Diego. Material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras naturales para la fabricación de tenso-estructuras. Bucaramanga, 2017, 36p. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías Fisicomecánicas

CONTRERAS, María. F. HORMAZA, Wilson. A. MARAÑÓN, A. Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. En: *Revista latinoamericana de metalurgia y materiales*. Julio, 2009, Vol. 1, No 1., p. 57-67

COX, Brian. FLANAGAN Gerry. Handbook composites of analytical methods for textile. Philadelphia, Pennsylvania: NASA contractor report, 1997. 176p

DAI, S. CUNNINGHAM, P. R. Multi-scale damage modelling of 3D woven composites under uniaxial tension. En: *Composites structure*. February, 2016, Vol. 142. p. 298-312

DELVASTO, S. TORO, E. F. PERDOMO, F. et al. An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. En: *Construction and building materials*. Septiembre, 2009, Vol. 24, no 2., p. 187-192

DIXIT, Anurag. MALI, Harlal. MISRA, R. K. Unit cell model of woven fabric textile composite for multiscale analysis. En: *Procedia engineering*. July, 2013, Vol. 68., p. 352-358

- DOITRAND, A. FAGIANO, C. CHIARUTTINI, V. et al. Experimental characterization and numerical modeling of damage at the mesoscopic scale of woven polymer matrix composites under quasi-static tensile loading. En: *Composites science and technology*. September, 2015, Vol. 119, p. 1-11
- EMAD, Omrani. PRADEEP, Menezes. PRADEEP, Rohtagi. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. En: *Engineering science and technology, an international journal*. October, 2015, Vol. 19, no 2., p. 717-736
- ENCISO, Jorge. ALDANA, Diego. Simulación de impacto a mallas de fibras de fique y guadua como refuerzo de un compuesto polimérico. En: *Revista colombiana de materiales*. Mayo, 2013, Vol. 5, p. 139-144
- GONZÁLEZ ESTRADA, Octavio. LEAL ENCISO, L. REYES HERRERA, J. D. Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos. En: *uis ingenierías*. Junio, 2016, Vol. 15, no 2., p. 105-116
- HIDALGO SALAZAR, Miguel. A. MUÑOZ, Mario. F. MINA, José. H. Influence of incorporation of natural fibers on the physical, mechanical, and thermal properties of composites LDPE-AL reinforces whit fique fibers. En: *International journal of polymer science*. March, 2015, Vol. 2015, 8p.
- HUGHES, Mark. CARPENTER, James y HILL Callum. Deformation and fracture behaviour of flax fibre reinforced thermosetting polymer matrix composites. En: *Springer Science + Business media*. March, 2007, Vol.42, no. 7., p. 2499–2511.
- IVANOV, Dmitry. VERPOEST, I. et al. Homogenisation of a sheared unit cell of textile composites: FEA and approximate inclusion model. En: *Revue européenne des éléments finis*. Diciembre, 2005, Vol. 14, no 6-7., p. 709-728

LA MANTIA, F. P. MORREALE, M. Green composites: A brief review. En: *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. January, 2011, Vol. 42, no 6., p. 579-588

LIBO, Yan. BOHUMIL, Kasal. LIANG, huang. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. En: *Composites part B: Engineering*. February, 2016, Vol. 92, p. 94-132

LIN, Hua. BROWN, Louise. P. LONG, A. Modelling and simulating textile structures using TexGen. En: *Advanced materials research*. September, 2011, Vol. 331, p. 44-47

LIN, Hua. SHERBURN, Martin. CROOKSTON, Jonathan. *Et al.* Finite element modelling of fabric compression. En: *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. March, 2008, Vol. 1, no 15008., 17p.

LOMOV, S. V. GUSAKOV, A. V. HUYSMANS, G. *et al.* Textil geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites. En: *Composites science and technology*. May, 2000, Vol. 60, no 11., p. 2083-2095

LOMOV, S. V. HUYSMANS, G. LUO, Y. *et al.* Textile composites: modelling strategies. En: *Composites - Part A: Applied Science and Manufacturing*. May, 2001, Vol. 32, no 10., p. 1379-1394

LOMOV, Stephan. IVANOV, Dmitry. MOLIMARD, Jerome. *et al.* Full-field strain measurements for validation of meso-FE analysis of textile composites. En: *Composites part A: Applied science and manufacturing*. September, 2007, Vol. 39, no 8., p. 1218-1231

LOMOV, Stephan. IVANOV, Dmitry. VERPOEST, Ignaas. *et al.* Meso-FE modelling of textile composites: road map, data flow and algorithms. En: *Composites science and technology*. October, 2006, Vol. 67, no 9., p. 1870-1891

LOZANO, Cristian. Deformación y fractura de una resina epóxica reforzada con fibra de algodón. Bogota, 2016, 162p. trabajo de grado para optar al título de magister en materiales y procesos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica.

MAHMOOD, Ansar. WANG, Xinwei. ZHOU, Chouwei. Modeling strategies of 3D woven composites: A review. En: *Composites structures*. March, 2001, Vol. 93, no 8., p. 1947-1963

MAHMOUD, M. A. NASSAR, Ramanathan. KHALID, Alzebdeh. Machinability of natural fiber reinforces composites: a review. EN: *the international journal of advances manufacturing technology*. February, 2017, Vol. 88, no 9., p. 2985-3004

MEZA, C. A. PAZOS, J. F. *et al.* Ultrasonic determination of the elastic constants of epoxy-natural fiber composites. En: *Physics procedia*. October, 2015, Vol. 70, p. 467-470

MIRAVETE, Antonio. CATEJÓN, Luis. Materiales compuestos. En: *Temas de disseny*. February, 2002, Vol. 20, p. 123-139

MIRAVETE, Antonio. LARRODE, Emilio. Materiales compuestos 1. Barcelona: reverté, 2007. 884p.

MITTAL, V. SAINI, R. and SINHA, S. Natural fiber-mediated epoxy composites - A review. En: *Compos. Part B*. June, 2016, vol. 99, p. 425–435

MITTAL, V. SAINI, R. and SINHA, S. State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. En: *Engineering science and technology, an international journal*. June, 2016 Vol. 19, no 2., p. 717-736

MONSERRAT, C. TUR, C. FUENMAYOR, F. Evaluación basada en el método del gradiente de las propiedades elásticas de tejidos humanos in vivo. En: *Uis ingenierías*. Septiembre, 2017, Vol. 16, no 1., p. 15-22

MONTEIRO, S. N. LOPES, F. P BARBOSA, A. P. et al. Natural lignocellulosic fibers as engineering material-An overview. En: *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. July, 2011, Vol. 42, no 10., p. 2963-2974

MUÑOZ, Mario. F. HIDALGO, Miguel. MINA, José. Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. En: *Rev. Bio. Agro*. Diciembre, 2014, Vol. 12, no 2., p. 60-70

PICKERING, K. L. ARUAN E, M. G. LE, T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. En; *composites part A: applied science and manufacturing*. September, 2015, Vol. 83, p. 98-112

POSADA CORREA, J, JARAMILLO ZAPATA, L. VILLEGAS, P et al. Estudio comparativo de negro de humo y alúmina como cargas reforzantes en mezclas de caucho natural. En: *uis ingenierías*. Marzo, 2014, Vol.13, no 2., p. 59-67

POVEDA MARTINEZ, Santiago. Representación normalizada de piezas de material compuesto. [En línea]. [19 noviembre de 2017]. Disponible en: <<http://ocw.upm.es>>

RAMOS, Jorge. Comportamiento mecánico de compuestos en matriz con resina epóxica y resina poliéster reforzados con fibra de carbono unidireccional. En: *Conamet*. 7p. 2008

SHERBURN, Martin. Geometric and Mechanical Modelling of Textiles. Nottingham, 2007, 272 p. Thesis (PhD). The University of Nottingham.

TINO RAMOS, Rubén. Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio. En: *Cimbra*. Febrero, 2010, Vol. 46, no 390., p. 42-52

WANG, X. F. WANG, X. W. ZHOU, G. M ZHOU, C. W. Multi-scale analyses of 3D woven composites based on periodicity boundary conditions. En: *journal of composite materials*. September, 2007, Vol.41, no 14., p. 1773-1788

ZAMOSC, León. El fique y los empaques en Colombia. Bogotá: dintel, 1981. 237p

ZHOU, Yonghui. MIZI, Fan. LIHUI, Chen. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. En: *Composites part B: Engineering*. June, 2016, Vol. 101, p. 31-45

ZIHUI, Xia. CHUWEI, Zhou. QIAOLING, Yong. et al. On selection of repeated unit cell model and application of unified periodic boundary conditions in micro-mechanical analysis of composites. En: *International journals of solids and structures*. March, 2005, Vol. 43, no 2., p. 266-278

ZIHUI, Xia. YUNFA, Zhang. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications. En: *International journals of solids and structures*. April, 2003, Vol. 40, no 8., p. 1907-1921