

Caracterización de un material compuesto a base del raquis de la palma de aceite, utilizando
modelos numéricos y experimentales

Luis Carlos Angulo Poveda

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero mecánico

Director

Octavio Andrés González Estrada
Ingeniero Mecánico, Phd.

Codirector

Oscar Rodolfo Bohórquez Becerra
Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2019

Agradecimientos

“A Dios, la vida y mi familia por brindarme esta oportunidad.”

Agradecimiento especial a Marisol Bayona, que me ayudó a sacar esta tesis adelante, sin ella esto no hubiese sido posible.

Ingeniero Oscar Bohórquez por su colaboración y confianza.

Contenido	
	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo general	13
1.2 Objetivos específicos	13
2. Marco teórico	14
2.1 Estado del arte	14
2.1.1 A nivel Internacional.	14
2.1.2 A nivel nacional.	15
2.2 Referentes teóricos	15
2.2.1 Materiales compuestos	16
2.2.2 Matriz.	16
2.2.2.1 Tipos de matriz.	17
2.2.2.2 Polímeros Termoestables.	17
2.2.2.3 Polímeros Termoplásticos.	18
3. Definición del problema	18
3.1 Modelado geométrico	19
3.1.1 Arquitectura de las probetas.	19
3.1.2 Modelado del laminado unidireccional.	20
3.2 Modelado de elasticidad para materiales compuestos	20
3.3 Modelo FEM	22
4. Resultados	23

4.1 Análisis experimental	23
4.1.1 Caracterización de la fibra.	23
4.1.2 Ensayo de tracción.	29
4.1.3 Ensayo de flexión.	33
4.1.4 Modelo elástico para compuestos unidireccionales.	34
4.1.5 Validación del modelo FEM.	35
4.2 Resultados FEM	36
5. Conclusiones	39
Referencias	40

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Materiales Compuestos(a) partículas (b) fibra (c) laminares.	16
<i>Figura 2.</i> Arquitectura molecular.	17
<i>Figura 3.</i> Estructura molecular (a) lineal (b) Ramificada	18
<i>Figura 4.</i> Fabricación(a) Molde de balsa (b) solidificación (c) Probetas	20
<i>Figura 5.</i> Condición inicial del raquis	23
<i>Figura 6.</i> Cabezal de fibra.	24
<i>Figura 7.</i> Maquina universal MTS BIONIX.	25
<i>Figura 8.</i> Grafica de esfuerzo-deformación.	26
<i>Figura 9.</i> Desviación estándar del módulo de Young.	28
<i>Figura 10.</i> Desviación estándar del esfuerzo ultimo.	28
<i>Figura 11.</i> Probeta sometida a tracción.	30
<i>Figura 12.</i> Esfuerzo VS deformación con 0% de concentración en fibra.	30
<i>Figura 13.</i> Desviación estándar del módulo de Young para 0% en fibra.	31
<i>Figura 14.</i> Grafica de tracción, 0%,5%,10%,15% en volumen de fibra.	32
<i>Figura 15.</i> Material compuesto a flexión	33
<i>Figura 16.</i> Modelo geométrico.	35
<i>Figura 17.</i> Esfuerzo equivalente de Von-Mises.	37
<i>Figura 18.</i> Esfuerzos normales: (a) sección longitudinal (b) sección transversal	38
<i>Figura 19.</i> Deformación longitudinal.	38

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Resultados prueba de tracción para fibra orgánica</i>	27
Tabla 2. <i>Propiedades mecánicas.</i>	29
Tabla 3. <i>Resultados solo resina</i>	31
Tabla 4. <i>Resultados de los ensayos de tracción</i>	32
Tabla 5. <i>Resultados de la prueba a flexión.</i>	34
Tabla 6. <i>Resultados del modelo elástico para unidireccionales.</i>	35
Tabla 7. <i>Error del modelo elástico Vs experimental.</i>	35
Tabla 8. <i>Resultados FEM vs Resultados experimentales.</i>	35

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO A BASE DEL RAQUIS DE LA PALMA DE ACEITE, UTILIZANDO MODELOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES.*

AUTORES: LUIS CARLOS ANGULO POVEDA**

PALABRAS CLAVE: Caracterización mecánica, materiales compuestos, métodos numéricos, Raquis de palma africana, refuerzos orgánicos.

RESUMEN

El estudio e implementación de nuevos materiales compuestos han significado grandes avances tecnológicos para la industria y el mundo que conocemos, siendo una alternativa interesante a la hora de afrontar nuevos retos de ingeniería, los cuales podrían parecer imposibles de solucionar con materiales convencionales. Entendiendo como material compuesto aquel que se forma por la unión de dos o más materiales distinguibles físicamente y separables mecánicamente, esto con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. En la presente investigación se caracterizaron las propiedades mecánicas de la fibra del raquis de la palma africana (*elaeis guineensis*), bajo la norma ASTM D3822, con el objetivo de evaluar su comportamiento como elemento de refuerzo en materiales compuestos. Se manejó como matriz resina epoxica R-744 y elemento de refuerzo la fibra en estudio, la elaboración de las probetas se llevó a cabo mediante moldeo abierto, realizando variaciones en la concentración volumétrica de fibra en 0%,5%,10% y 15%. Las pruebas experimentales se desarrollaron bajo las normas ASTM D3039 y ASTM D7264 para tracción y flexión respectivamente.

Mediante elementos finitos se desarrolló un modelo a meso-escala el cual permite aproximar la respuesta mecánica del material bajo las condiciones establecidas, validando los resultados obtenidos experimentalmente. determinando la relación de resistencia-peso, lo cual hace posible la disminución en volumen en aplicaciones industriales, brindando así la posibilidad de nuevos usos para el raquis de la palma africana.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Octavio Andrés González Estrada Ingeniero Mecánico, Phd. Codirector Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra Ingeniero mecánico

ABSTRACT

TITLE: CHARACTERIZATION OF A COMPOSITE MATERIAL BASED ON THE RAKE OF THE PALM OF OIL, USING NUMERICAL AND EXPERIMENTAL MODELS.*

AUTHORS: LUIS CARLOS ANGULO POVEDA**

KEYWORDS: African palm rachis, Composite materials, Mechanical characterization, Numerical methods, Organic reinforcements.

DESCRIPTION:

The study and implementation of new composite materials have meant great technological advances for the industry and the world we know, being an interesting alternative when facing new engineering challenges, which could seem impossible to solve with conventional materials. Understanding as a composite material that which is formed by the union of two or more physically distinguishable materials and mechanically separable, this in order to improve their mechanical properties. In the present investigation, research the mechanical properties of the rachis fiber of the African palm (*elaeis guineensis*), under the ASTM D3822 standard, were characterized in order to evaluate their behavior as a reinforcing element in composite materials. We were used the R-744 epoxy as the matrix and the reinforcement element were used the fiber as under study, the elaboration of the test pieces was carried out by open molding, making variations in the volumetric concentration of fiber in 0%, 5%, 10% and 15 %. The experimental tests for the compound were developed under the norms ASTM D3039 and ASTM D7264 for traction and flexion respectively.

In order to validate the results obtained, a model was developed by means of finite element analysis which allows to approximate the mechanical response of the material in the established conditions, determining the resistance-weight ratio, which makes possible the decrease in volume in industrial applications, thus providing the possibility of new uses for the African palm spine.

* Degree work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director Octavio Andrés González Estrada Mechanical Engineer, Phd. Codirector Oscar Rodolfo Bohorquez Becerra Mechanical Engineer

Introducción

Los materiales compuestos representan una clase de materiales de ingeniería con interés técnico y científico especial ya que no solo son un reemplazo de materiales ferrosos y no ferrosos (14), sino también la solución perfecta para resolver toda una serie de problemas técnicos en diferentes ramas de la industria (39), los cuales serían difíciles de resolver con materiales convencionales. Un material compuesto es aquel que está formado por dos o más componentes de tal manera que las propiedades del material resultante son mayores que las de cada elemento por separado (24). Existen principalmente dos componentes: El agente reforzante el cual es el encargado de aportar resistencia a la tracción y la matriz que usualmente es una resina epoxi y o poliéster, la cual envuelve y fija las fibras transfiriendo la carga al elemento reforzante, protegiéndolas del deterioro mecánico y químico (23).

La palma africana es cultivada principalmente en Malasia, Indonesia, Tailandia y en el Oeste y Centro de África (38). La expansión del cultivo de palma de aceite en Colombia ha mantenido un crecimiento sostenido (21). A mediados de la década de los 60's existían 18.000 hectáreas sembradas, hoy existen más de 220.000 hectáreas en 73 municipios del país (30). El aceite se extrae de la porción pulposa de la fruta mediante varias operaciones convencionales (37), las cuales producen grandes cantidades de subproductos lignocelulósicos, en forma de hojas, racimos vacíos (raquis), torta de palmiste, fibras de cáscara y cuesco (25, 5). Para esta industria, la disposición de los residuos generados durante su proceso productivo representa un gran desafío, ya que estos deben ser aprovechados o tener algún tratamiento antes de ser desechados (40). En la actualidad, la abundante cantidad de racimos vacíos o raquis ha creado un importante problema ambiental debido a la generación de hongos y moscas en los residuos acumulados (29).

Se han desarrollado múltiples investigaciones con el fin de dar un uso significativo al raquis de la palma africana. en (31) se estudió la producción de pulpa para obtener papel a partir del raquis de la palma africana, se concluyó que de las propiedades analizadas solo la tensión y el rasgado reportaron valores cercanos a los valores del papel fabricados con pino. En (1) se concluyó que técnicamente es factible utilizar la fibra en inserciones para mejorar las propiedades mecánicas estructurales de cartones de denominación comercial 620 y 720 kgf/m, aumentando así la vida útil de los embalajes y aplazando su disposición final en los rellenos sanitarios.

La presente investigación parte del desarrollo actual de la mecánica de materiales centrándose en el análisis de materiales compuestos (4), entre ellos aquellos que contienen fibras de refuerzo orgánicas (35, 19). La fibra bajo esta investigación se caracterizó bajo la norma ASTM D3822 y se utilizó como material de refuerzo para una matriz polimérica (15), creando así un nuevo material compuesto con el cual se va a evaluar el comportamiento de la fibra como elemento reforzante (26).

se realizaron pruebas experimentales bajo las normas ASTM D3039 y ASTM D7264 (para tracción y flexión respectivamente) (12), Determinando la respuesta mecánica del material compuesto en estudio. Para este tipo de análisis se hace necesario el uso de métodos finitos (FEM) (2, 34), el cual permite desarrollar una serie de técnicas para la discretización y cálculo de las microestructuras generadas, siendo los métodos finitos una técnica comúnmente utilizada para estudiar el comportamiento de los materiales al sufrir el efecto de fuerzas externas (3, 42). Se uso el software de simulación ingenieril ANSYS con el fin de recrear el modelo geométrico en 3D (13 ,22), simulando las cargas y aproximando la respuesta mecánica del material compuesto, Validando los resultados obtenidos experimentalmente (18).

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Caracterizar las propiedades mecánicas de un material compuesto reforzado con fibras del raquis de la palma de aceite, embebido en una matriz de resina R-744.

1.2 Objetivos específicos

- Diseñar, elaborar y realizar pruebas experimentales a probetas del material compuesto a estudiar bajo las normas ASTM D3039M-08 y D7264M-07 para tracción y flexión respectivamente.
- Desarrollar un modelo numérico mediante elementos finitos de la micromecánica del material propuesto.
- Desarrollar un modelo numérico a mesoescala que permita representar la respuesta mecánica del material compuesto para diferentes configuraciones del refuerzo.

2. Marco teórico

2.1 Estado del arte

2.1.1 A nivel Internacional.

Tailoring of interfaces in glass fiber reinforced polymer composites(8). Este artículo tiene como objetivo caracterizar la interfase de un material compuesto por fibras de vidrio y polímeros orgánicos, así como sus efectos sobre las propiedades mecánicas del material en general.

Comparison of mechanical properties of date palm fiber- polyethylene composite(36). Este artículo tiene como objetivo caracterizar las propiedades morfológicas, químicas y mecánicas de la fibra del raquis proveniente de la palma datilera y compararlas con otras fibras del mismo árbol provenientes del tronco y el pecíolo.

Natural fiber-mediated epoxy composites e A review (27). En esta revisión se recogen diferentes investigaciones sobre materiales compuestos utilizando como material de refuerzo fibras orgánicas, teniendo en cuenta la influencia de factores tales como: geometría de la fibra, contenido de fibra, tamaño de la fibra, en las propiedades del material compuesto.

Modelización numérica del comportamiento de un material compuesto de tejido de fibra de carbono y matriz epoxi ante cargas dinámicas.(33). En este trabajo se utiliza un modelo numérico y computacional con el fin de predecir y validar la respuesta mecánica de un material compuesto ante cargas dinámicas variando parámetros como velocidad y tiempo con carga.

Multi-scale damage modelling of 3D woven composites under uni-axial tension(17). Este artículo presenta un análisis numérico detallado de dos tipos de arquitectura compuesta trenzada

en 3D con un modelo a mesoescala de elementos finitos y un modelo a masoescala para simular el comportamiento del daño causado dentro de la zona elástica.

2.1.2 A nivel nacional.

Desarrollo de un material compuesto a base de fibras de bambú para aplicaciones aeronáuticas.(19). Este artículo busca el desarrollo de un material compuesto utilizando como material de refuerzo la fibra del bambú embebido en resina epoxica, utilizando métodos de fabricación con molde abierto, para aplicaciones aeronauticas.

Generación de modelos de material compuesto con TexGen y exportación a ANSYS(11). Este artículo describe la metodología apropiada para diseñar modelos geométricos de fibras, tejidos y materiales compuestos en el software de diseño TexGen, con el fin de fijar las propiedades de los materiales a interactuar.

Materiales compuestos orgánicos utilizados como refuerzo de tuberías de conducción de fluidos(15). En este documento se presentan las pruebas experimentales y sus resultados, para el refuerzo y recubrimiento de tuberías de transporte de fluidos, las cuales han sufrido abolladuras y picaduras por corrosión.

2.2 Referentes teóricos

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

2.2.1 Materiales compuestos. Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales diferentes que poseen una interfase discreta y reconocible que los separa.

No deben disolverse ni fusionarse completamente unos con otros. Su caracterización, y la de su interfase, debe ser posible identificar por medios físicos; Dicho de otra manera, que las propiedades del material compuesto dependen del tipo de interfase y de las características de los componentes

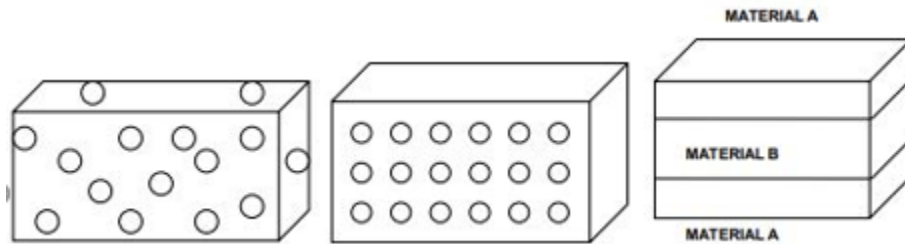


Figura 1. Materiales Compuestos(a) partículas (b) fibra (c) laminares.

El reto actual de los materiales compuestos consiste en dar con las mejores asociaciones de fibra-matriz, proporcionando cada vez materiales con mejores prestaciones para el fin que son concebidos(9) .

2.2.2 Matriz. La función principal de la matriz es la de distribuir los esfuerzos entre las fibras a través de la interacción, manteniendo unidas las fibras por medio de fuerzas adhesivas y cohesivas, además tiene otras funciones como:

- Fijación de las fibras en la configuración geométrica deseada.
- Protección de las fibras a los medios externos (humedad, ataques químicos, entre otros).
- Protección a las fibras de los esfuerzos de compresión.

La resistencia de la matriz toma importancia cuando la dirección del refuerzo no coincida con la dirección de la carga, el tipo y el material de la matriz definen el rango de temperatura a las cuales se puede someter el material compuesto(41).

2.2.2.1 Tipos de matriz. De las diferentes clasificaciones que podemos hacer de los materiales compuestos, quizá la más importante sea la que se refiere a su matriz en la cual podemos identificar tres grupos principales:

- Materiales compuestos con matriz cerámica
- Materiales compuestos con matriz metálica
- Materiales compuestos con matriz polimérica

Son estos últimos a los que dedicaremos este estudio, debido a que ocupan el papel mas importante dentro de la construcción naval actual. Según el criterio de comportamiento y procesabilidad frente al calor podemos clasificarlos en termoestables y termoplásticos(6).

2.2.2.2 Polímeros Termoestables. Son polímeros que no pueden fluir por efecto de la temperatura para ser moldeados, molecularmente hablando son polímeros entrecruzados y tienden a ser resinas de mucha rigidez. Someterlos a temperatura elevada promueve la descomposición química del polímero (carbonización).

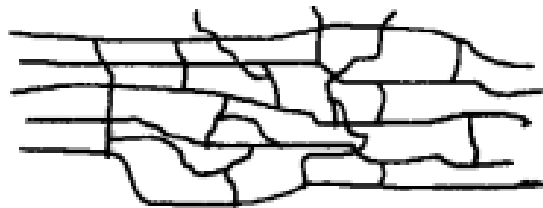


Figura 2. Arquitectura molecular de polímeros termoestables.

Fuente: Jiménez MA, Castejón L, Miravete A. Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles
Composite materials from new textile technologies. 1997;47(c):83–91.

2.2.2.3 Polímeros Termoplásticos. Son polímeros que al calentarse a determinada temperatura se convierten en fluidos, permitiendo su maleabilidad en la forma deseada que quedara reservada al enfriarse por lo cual son de mayor uso comercial. Su estructura molecular puede ser lineal o ramificada(41).

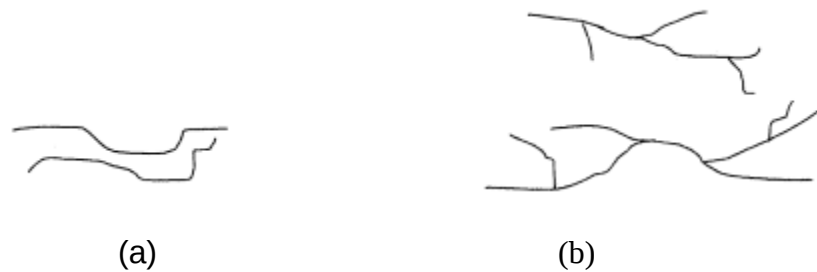


Figura 3. Estructura molecular de un polímero termoplástico (a) lineal (b) Ramificada

Fuente: Jiménez MA, Castejón L, Miravete A. Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles Composite materials from new textile technologies. 1997;47(c):83–91.

3. Definición del problema

Se caracterizaron las propiedades mecánicas de la fibra del raquis de palma africana *elaeis guineensis*, con el fin de determinar su comportamiento como elemento de refuerzo en materiales compuestos, para esto se utilizó como matriz resina epoxica R-744, realizando variaciones en fracción volumétrica del 5%, 10% y 15% en concentración de fibra, siendo esta una manera fácil y efectiva de tener control sobre la cantidad de fibra y resina dentro del compuesto. Una vez realizadas las pruebas experimentales bajo la norma ASTM D3039M-08 y D7264M-07 para tracción y flexión respectivamente se desarrolló un modelo FEM con el fin de validar los resultados del material compuesto estudiado.

3.1 Modelado geométrico

3.1.1 Arquitectura de las probetas. Una vez caracterizada la fibra se procede a evaluar su comportamiento como elemento de refuerzo, para ello se elaboró un material compuesto formado por una matriz de resina epoxica R-744 la cual tendrá como función fijar la geometría del compuesto, transferir cargas al refuerzo, así como la protección al deterioro mecánico y químico. Las fibras del raquis de palma africana *elaeis guineensis* actúan como elemento de refuerzo continuo encargado de absorber las tensiones.

El proceso de fabricación se llevó a cabo mediante moldeo abierto, utilizando balsa para la elaboración de los moldes, las fibras se ubican en dirección longitudinal, se precargan y pegan a un extremo del molde, luego de esto se vierte el epoxi hasta que cubra la totalidad de las fibras y alcance la dimensión requerida, dejando secar por 7 horas, luego de esto se cortan, como se muestra en la figura 4. Para el desarrollo de las pruebas experimentales se realizaron variaciones en la concentración volumétrica de 5%,10% y 15% en fibra, todas las probetas se dimensionaron a 5x10x100 mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Fabricación(a) Molde de balsa (b) solidificación (c) Probetas

3.1.2 Modelado del laminado unidireccional. Por tratarse de un laminado unidireccional se utilizó como base de cálculos teóricos para las propiedades mecánicas la relación de mezclas con el fin de predecir el comportamiento del material compuesto:

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

$$G_{12} = G_m * \frac{(G_f + G_m) + V_f * (G_f - G_m)}{(G_f + G_m) - V_f * (G_f - G_m)} \quad (2)$$

$$U_{12} = U_f * V_f + U_m * (1 - V_f) \quad (3)$$

Donde:

E_1 = Modulo de elasticidad del material compuesto

E_f =Modulo de elasticidad de la fibra

E_m =Modulo de elasticidad de la matriz

V_f =Porcentaje volumétrico de fibra presente en el compuesto.

3.2 Modelado de elasticidad para materiales compuestos

Se puede decir que el comportamiento mecánico de los materiales compuestos se caracteriza a través de modelos elásticos que intentan predecir con la mayor precisión posible la respuesta 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 (42). 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 Ω . 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 $\forall \mathbf{v} \in \mathbf{V}$:

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

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

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 matriz de rigidez C se puede expresar como:

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

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

3.3 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 repreenta la matriz global de rigidez del material, u representa el campo de desplazamientos y F las fuerzas nodales

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

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

$$\int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \, d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{v}^T \mathbf{b} \, d\Omega + \int_{\Gamma_N} \mathbf{v}^T \mathbf{t} \, d\Gamma \quad (16)$$

4. Resultados

4.1 Análisis experimental

4.1.1 Caracterización de la fibra. Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron fibras provenientes del raquis de la palma africana las cuales fueron recibidas como subproducto del proceso de extracción de aceite. En su condición inicial las fibras se obtuvieron mediante extracción manual y presentaron dimensiones las cuales oscilaban entre 5 y 30 cm de largo como se muestra en la figura 5.



Figura 5. Condición inicial del raquis

La norma establece como mínimo una muestra compuesta por 10 datos, para el desarrollo de esta investigación se seleccionaron un total de 14 fibras continuas las cuales se dimensionaron a 15 cm de longitud. se determinó como diámetro medio de la fibra $0,5 \pm 0,02$ mm.

Debido al diámetro de la fibra fue necesario elaborar un cabezal para el anclaje a la máquina, este cabezal presento las siguientes dimensiones 25x20x4 mm. Como se muestra en la figura 6, dejando como longitud de trabajo 100 mm.



Figura 6. Cabezal de fibra.

El ensayo se desarrolló en una maquina universal MTS BIONIX la cual permite aplicar carga constante y cuenta con un equipo de adquisición de datos el cual procesa y almacena la magnitud de la carga y deformación que sufre nuestro elemento de análisis, la velocidad de aplicación de carga fue designada mediante la norma ASTM D3822-14 y fue un valor constante de 2mm/min en dirección 0° como se muestra en la figura 7. La prueba se llevo a cabo un total de

14 veces, descartando los dos valores máximos y mínimos, esto con el fin de trabajar con valores medios en el calculo de las propiedades mecánicas.



Figura 7. Maquina universal MTS BIONIX.

El módulo de Young o módulo de elasticidad es una constante que indica la carga necesaria para producir un alargamiento dentro de la zona elástica en la curva tensión-deformación de un material (37). Esta determinado por

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (13)$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad (módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young).

σ es la tensión ejercida sobre el área de la sección transversal del elemento (tensión = fuerza/área)

ϵ es la deformación unitaria entendida como la relación entre el cambio de longitud con respecto a la longitud inicial.

Los datos que se obtuvieron durante la prueba fueron: fuerza N, deformación mm, y tiempo S con lo cual es posible determinar el módulo de Young de la fibra, así como la resistencia a la tracción o esfuerzo último. Los resultados fueron analizados con el fin de determinar los valores aproximados.

Debido a que la zona elástica de la curva viene dada por una recta, el módulo de Young es también la pendiente en el origen de la curva tensión-deformación como se muestra en la figura 8. Donde podemos observar la relación de esfuerzo-deformación correspondiente a la fibra 1 de nuestra muestra, en donde la pendiente tiene un valor de 985.6 MPa siendo este el valor del módulo de Young calculado para esta fibra.

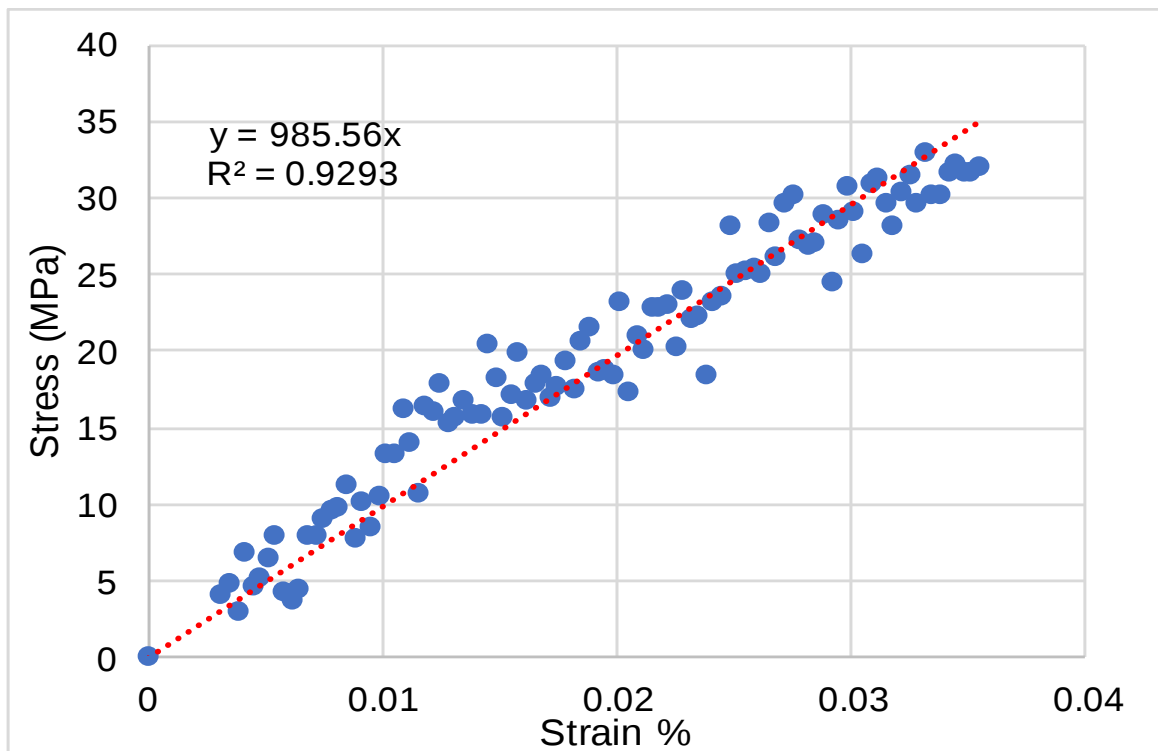


Figura 8. Grafica de esfuerzo-deformación.

Los resultados obtenidos para cada una de las fibras se muestran en la tabla 1. Donde podemos observar que el valor de módulo de Young oscila entre el rango de 889.45 MPa y 1088.67 MPa.

Se determinó como valor medio E: 960 MPa como el valor del módulo de Young de la fibra estudiada, con una desviación estándar de S: 60 MPa, como se muestra en la figura 9.

Tabla 1.

Resultados prueba de tracción para fibra orgánica

Fibra	Modulo de young (MPa)	Esfuerzo último (MPa)
1	985.56	93.31
2	974.72	115.28
3	904.12	108.75
4	1088.67	104.70
5	980.56	139.72
6	955.86	78.45
7	925.09	127.32
8	1018.68	144.70
9	889.45	144.49
10	891.89	77.291

El esfuerzo ultimo o resistencia a la tensión σ_u corresponde al valor máximo de esfuerzo que se puede aplicar sobre el material. Cuando el esfuerzo aplicado se iguala al esfuerzo último se inicia la estricción seguido de la fractura, se calculó como la relación entre la carga de fractura y el área transversal de cada elemento. En la tabla 1 podemos observar que el valor del esfuerzo ultimo está contenido en el rango de 77.29 Mpa y 144.70 Mpa.

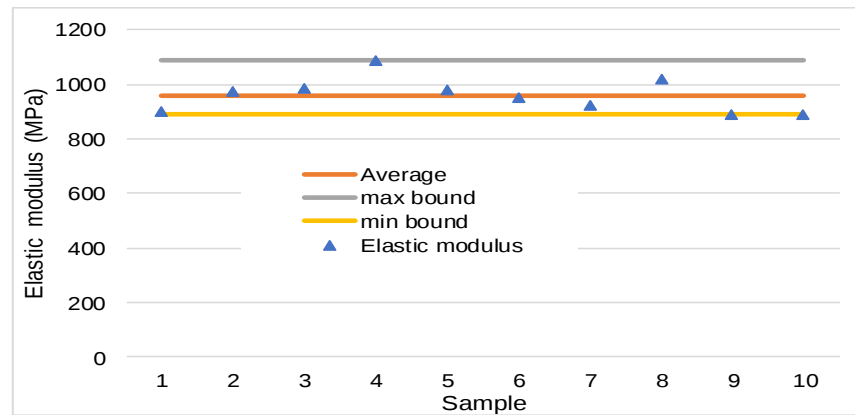


Figura 9. Desviación estándar del módulo de Young.

Se aproximó como valor medio σ : 110 MPa para el esfuerzo último, con una desviación estándar de S:25 MPa, como se muestra en la figura 10.

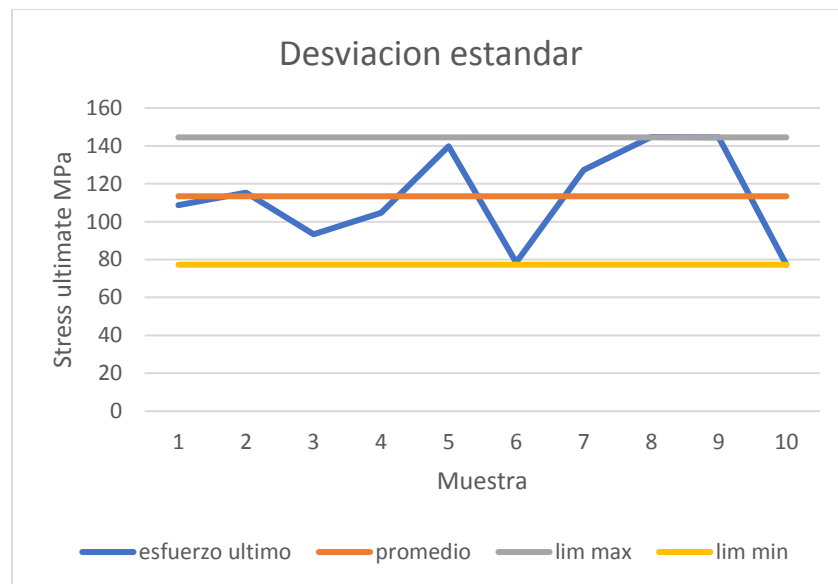


Figura 10. Desviación estándar del esfuerzo ultimo.

En la tabla 2 se sintetizan las propiedades obtenidas para la fibra del raquis de la palma africana *Elaeis guineensis* aproximadas de manera experimental en esta investigación.

Tabla 2.

Propiedades mecánicas.

Fibra	Diametro	Densidad	Deformación	$\sigma_{u \text{ prom}}$	$\sigma_{u \text{ max}}$	$\sigma_{u \text{ min}}$	E_{prom}	E_{max}	E_{min}
	mm	g/cm ³	%	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Elaeis	0.48-0.52	1.25	8 - 10	110	144	77	960	1089	889
Guineensis									

4.1.2 Ensayo de tracción material compuesto. El ensayo de tracción es una prueba mecánica que realiza a un material, con con el fin de determinar propiedades mecánicas como: esfuerzo último, módulo de Young, coeficiente de poisson entre otros.

Las pruebas se llevaron a cabo en una maquina universal MTS BIONIX, bajo la norma ASTM D3039. Para el ensayo se realizaron variaciones en la cantidad de fibra del 0%,5%,10% y 15% en volumen, esto con el fin de analizar el comportamiento del compuesto a medida que aumenta el refuerzo. Las probetas se dimensionaron a una longitud de 100 ± 2 mm, la altitud es de 0.5 ± 1 mm y el ancho es de $10 \pm 0,1$ mm, la aplicación de la carga se realizó a una velocidad constante de 3 mm/min. Utilizando 5 probetas por cada una de las variaciones en volumen. Las probetas sometidas a tracción se muestran en la figura 11.

Debido a que la zona elástica de la curva viene dada por una recta, el módulo de Young es también la pendiente en el origen de la curva tensión-deformación. En la figura 12 tenemos el comportamiento de la probeta número 1 con una concentración de 0% en fibra, donde podemos observar que el valor de su pendiente es 1.6 GPa siendo este el valor del módulo de Young calculado para esta probeta.



Figura 11. Probeta sometida a tracción.

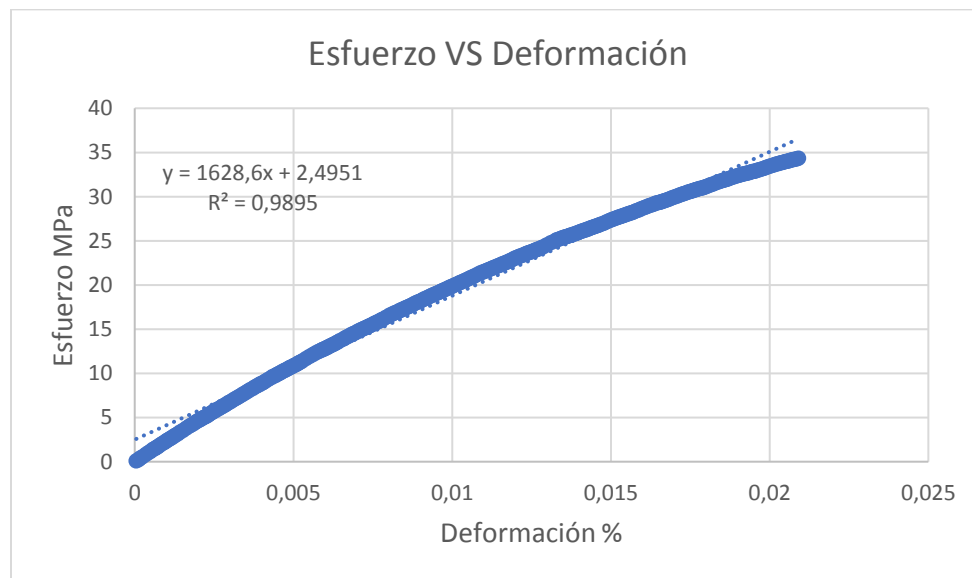


Figura 12. Esfuerzo VS deformación con 0% de concentración en fibra

Los resultados obtenidos para cada una de las probetas con 0% de fibra se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.

Resultados solo resina

probeta 0%	Módulo de young Gpa	Esfuerzo ultimo MPa
1	1.6	304.80
2	2.1	216.35
3	1.9	291.22
4	1.4	412.35
5	2.2	399.54

Se determinó como valor aproximado $E=1.84$ GPa como el valor del módulo de Young de la probeta estudiada al 0% de concentración en fibra, con una desviación estándar de $S=0.36$ GPa, como se muestra en la figura 13.

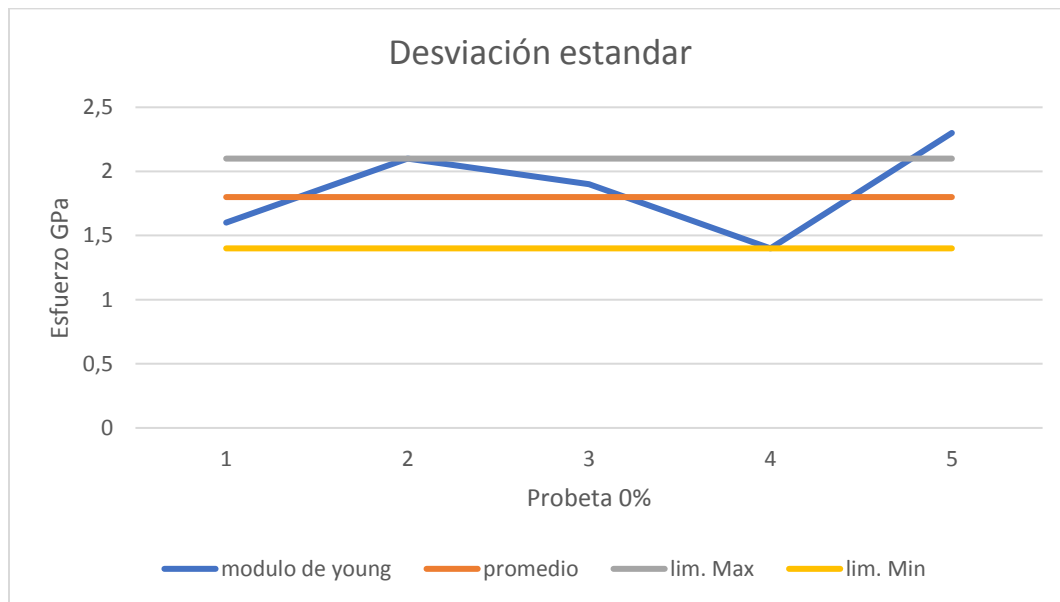


Figura 13. Desviación estándar del módulo de Young para 0% en fibra.

Se realizó el mismo procedimiento para cada una de las variaciones en fibra y los resultados se muestran en la figura 14, donde se puede observar el comportamiento del material compuesto a medida que se incrementa el porcentaje de fibra en el mismo.

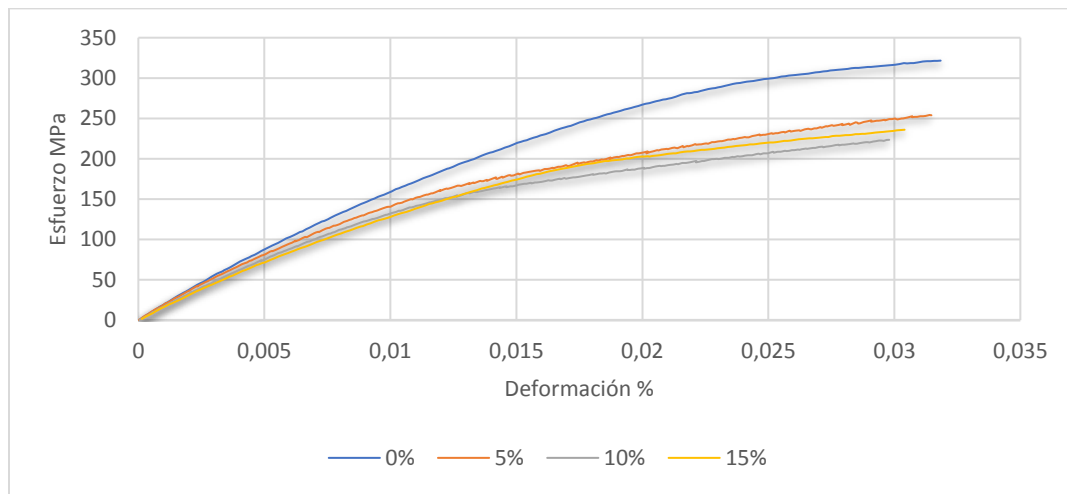


Figura 14. Grafica de tracción, 0%,5%,10%,15% en volumen de fibra.

Con los datos obtenidos se procedió a calcular el módulo de Young (E) para cada una de las concentraciones de fibra estudiadas, los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4.

Resultados de los ensayos de tracción

% de fibra	$\sigma_{\max}$ [MPa]	$\epsilon_{\max}$ %	E [GPa]
0	331.8±70	0.032±0.0027	1.84±0.36
5	274.8±45	0.031±0.0032	1.72±0.25
10	187±55	0.031±0.009	1.67±0.29
15	194.2±27	0.029±0.011	1.61±0.25

En la tabla 4 y figura 14 podemos observar la influencia del refuerzo en las propiedades del material compuesto, dejando en evidencia como a medida que incrementa la cantidad de fibra el módulo de Young del compuesto disminuye, esto se debe a que el módulo de la matriz es mucho mayor al módulo de la fibra, de igual manera el esfuerzo ultimo y capacidad de deformación hacen lo mismo. por estos motivos se es recomendable utilizar esta fibra como elemento de refuerzo en una matriz de menor calidad.

4.1.4 Ensayo de flexión. Bajo la norma ASTM D7264 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.

El ensayo se llevó a cabo en una maquina universal MTS BIONIX, con una velocidad constante de 2 mm/min, como se muestra en la figura 15. Las probetas se dimensionaron a una longitud de 100 ± 2 mm, la altitud es de 0.5 ± 1 mm y el ancho es de $10 \pm 0,1$ mm.

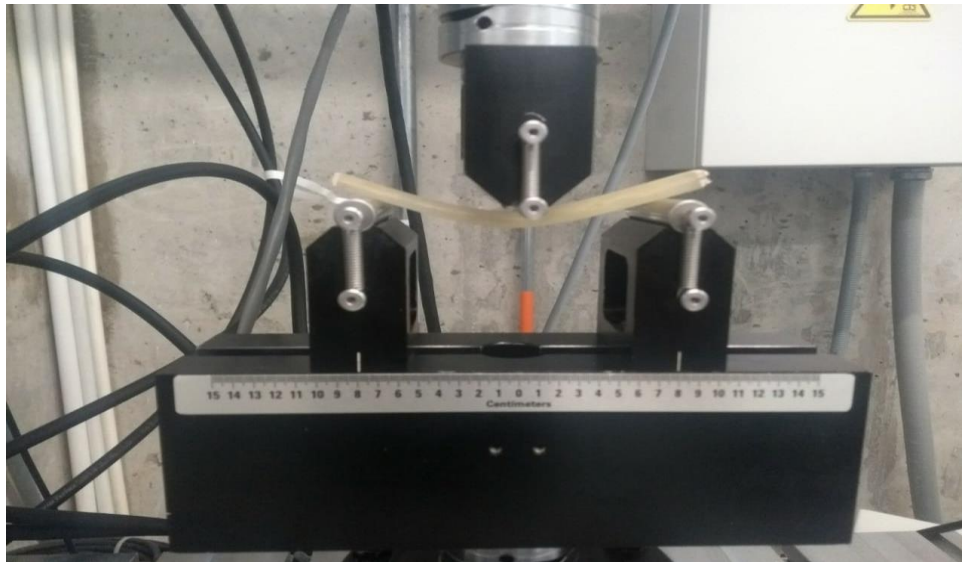


Figura 15. Material compuesto a flexión

Una vez realizadas las pruebas experimentales se procede analizar los resultados obtenidos, presentados en la tabla 5, donde se muestra el comportamiento de la probeta con solo resina e incrementos del 5%,10%, y 15% en fibra.

Tabla 5.

Resultados de la prueba a flexión.

% de fibra	$\sigma_{f_{max}}$ [MPa]	$\% \epsilon_{f_{max}}$	E_f [GPa]
0	166.7 $\pm$ 1	0.092 $\pm$ 0.0038	2.57 $\pm$ 0.28
5	155 $\pm$ 6	0.11 $\pm$ 0.016	2.4 $\pm$ 0.25
10	140.8 $\pm$ 13	0.11 $\pm$ 0.011	2.33 $\pm$ 0.28
15	129.4 $\pm$ 18	0.11 $\pm$ 0.011	2.18 $\pm$ 0.7

4.1.5 Modelo elástico para compuestos unidireccionales. Con el fin de realizar un análisis preliminar se obtuvo mediante regla de mezclas las propiedades elásticas que se esperaban obtener en el material compuesto, partiendo de las ecuaciones (1) y (2) con un $E_m=1.86$ [MPa], $E_f= 960$ [MPa] y teniendo una variación en volumen del 0%,5%,10% y 15% en fibra, para la ecuación (3) se tiene que $G_m=550$ MPa Y $G_f=110$ MPa y por ultimo para la ecuación (4) se usaron $\nu_f =0.22$ calculado experimentalmente y $\nu_m =0,35$ suministrado por el proveedor. Se logra estipular la respuesta mecánica del material compuesto en estudio.

Resolviendo las ecuaciones planteadas con los datos suministrados en el párrafo anterior se muestran los resultados obtenidos en la tabla 6.

Los resultados obtenidos mediante las relaciones de mezclas son una proyección del comportamiento mecánico que debe tener nuestro material compuesto, partiendo de las propiedades físicas de cada elemento por separado, el error presentado entre los resultados experimentales y el estipulado mediante la regla de mezclas se presenta en la tabla 7.

Tabla 6.

Resultados del modelo elástico para unidireccionales.

% de fibra	E ₁ [Gpa]	E ₂ [Gpa]	G ₁₂ [Gpa]	ν_{12}
0	1.86	1.86	0.36	0.35
5	1.81	1.77	0.34	0.34
10	1.77	1.70	0.32	0.33
15	1.72	1.63	0.30	0.33

Tabla 7.

Error del modelo elástico Vs experimental.

% de fibra	E ₁ [GPa]	E _{exp} [GPa]	% error
0	1.86	1.84	1%
5	1.81	1.72	5%
10	1.77	1.67	6%
15	1.72	1.61	6%

4.1.6 Validación del modelo FEM. Con el objetivo de validar los resultados obtenidos experimentalmente se desarrolló mediante elementos finitos el modelo geométrico del material compuesto como se muestra en la figura 16.

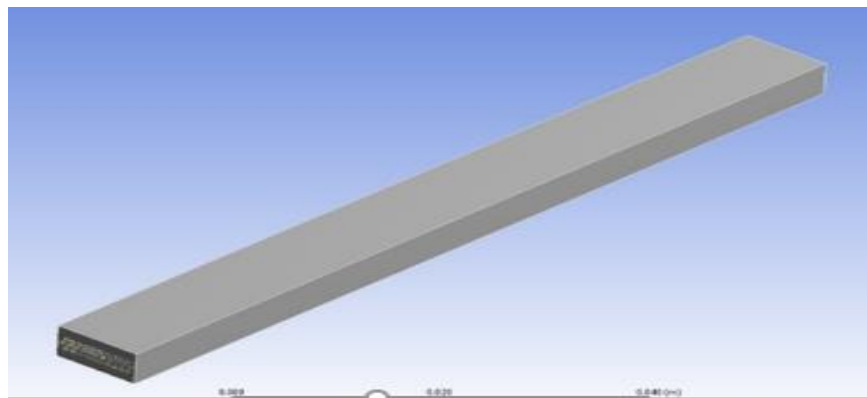


Figura 16. Modelo geométrico.

Se aplicaron cargas a tracción y se calcularon las propiedades elásticas del material para cada una de las fracciones volumétricas en fibra, con su respectivo porcentaje de error respecto a los resultados obtenidos experimentalmente, como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8.

Resultados FEM vs Resultados experimentales.

% fibra	E_{FEM} [GPa]	E_{exp} [GPa]	%error
5	1.83	1.72	6%
10	1.74	1.67	4%
15	1.66	1.61	3%

4.2 Resultados FEM

Con el modelo geométrico presentado en la figura 16 se procedió a aplicar una carga de 1GPa, con el objetivo de conocer la distribución de esfuerzos equivalentes (Von mises) como criterio de falla, este se muestra en la figura 17, de igual manera se muestra el esfuerzo normal dentro del material compuesto en la figura 18, Analizando estas figuras se puede observar que las fibras longitudinales están soportando la menor cantidad de esfuerzo dentro del compuesto, por lo cual la matriz resiste la mayor cantidad de carga, soportando esfuerzos de hasta 2.8 MPa. En la figura 19 se visualiza la deformación que sufre el material compuesto respecto a la carga aplicada logrando deformaciones de hasta 0.0078 mm en dirección longitudinal con lo cual es posible determinar el valor del módulo de Young del compuesto para cada una de las variaciones volumétricas. Con estos resultados se corrobora el hecho de que al tener la matriz un mayor módulo de elasticidad que la fibra, está es

la encargada de soportar la mayor cantidad energía, dejando en evidencia que esta fibra no es óptima como elemento de refuerzo para este polímero.

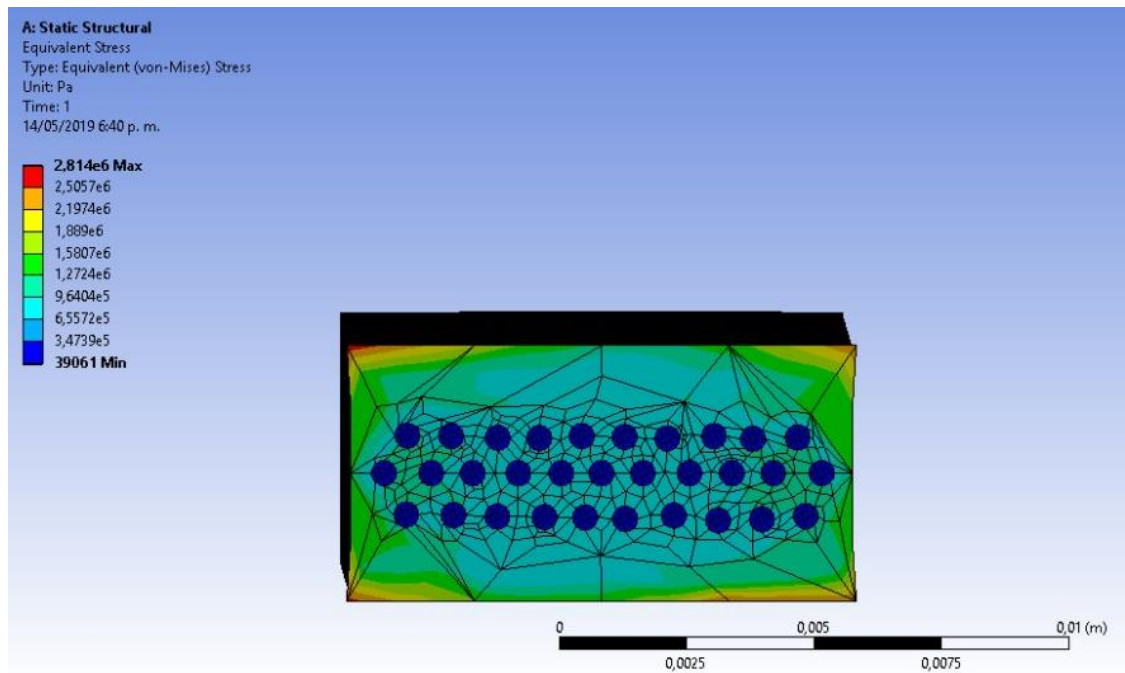
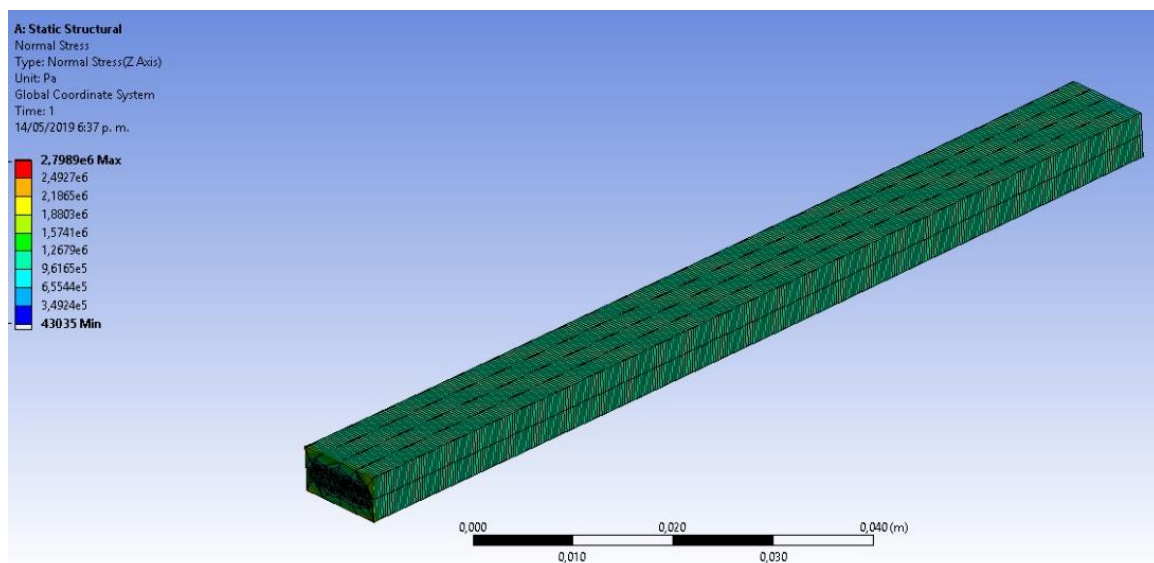
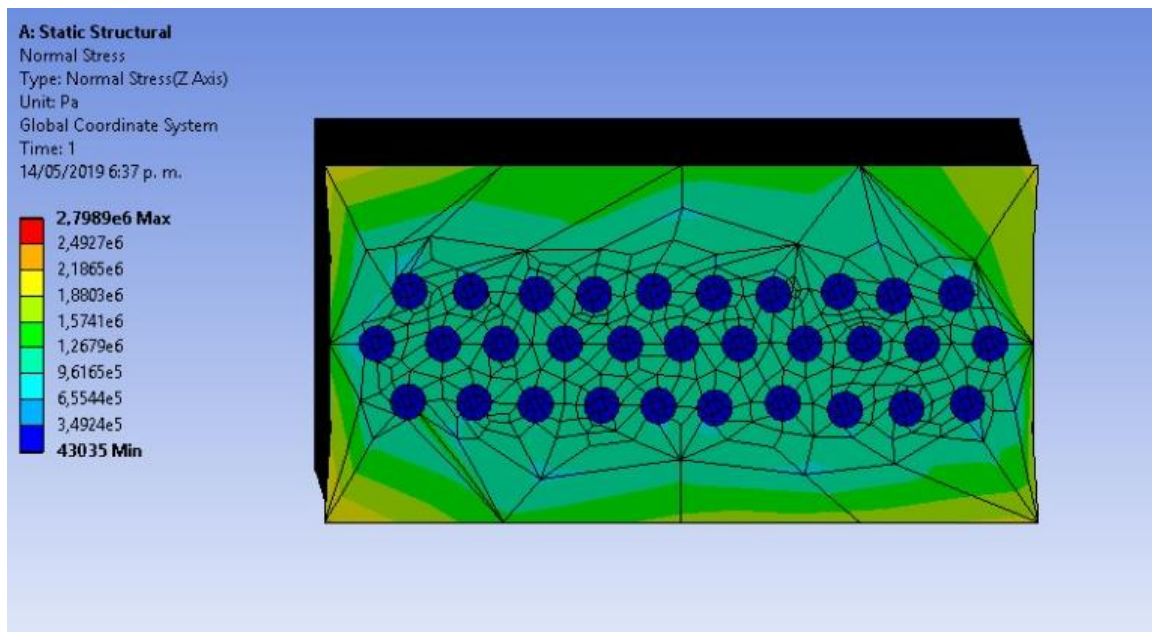


Figura 17. Esfuerzo equivalente de Von-Mises.



(a)



(b)

Figura 18. Esfuerzos normales: (a) sección longitudinal (b) sección transversal

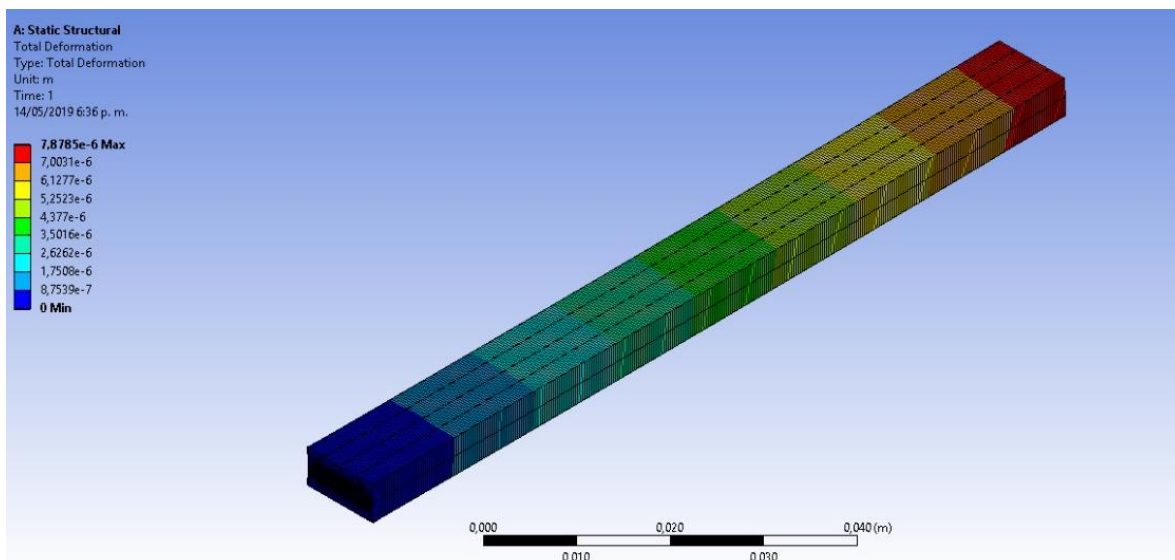


Figura 19. Deformación longitudinal.

5. Conclusiones

El módulo de elasticidad promedio para la fibra del raquis de palma africana es de 960MPa y el esfuerzo ultimo promedio es de 110MPa. La fibra presenta el comportamiento de un material dúctil logrando deformaciones significativas de 8% a 10% antes de romperse, en esta investigación no se midió la influencia de la humedad presente en el raquis, por lo tanto, se recomienda para futuras investigaciones tener en cuenta esta variable.

Las propiedades mecánicas de la resina R-744 son superiores a las de la fibra seleccionada, provocando como consecuencia la disminución en las propiedades del compuesto a medida que se incrementaba la concentración de fibra en el mismo, por estos motivos es recomendable utilizar esta fibra como elemento de refuerzo en una matriz de menores propiedades mecánicas.

La utilización de FEM como herramienta para predecir el comportamiento de distintos fenómenos físicos, presento una buena aproximación a los valores cercanos obtenidos experimentalmente con márgenes de error menores al 7%.

Referencias

1. Angarita M. JD, Díaz D .D. I., Lozano U .L. A. Fibra de palma africana (*Elaeis Guineensis*) para mejorar las propiedades mecánicas del cartón reciclado. *Ion*. 2009; 22(1):63–71.
2. B JSL, Pertuz A. Damage in fiberglass composite laminates used for pipeline.
3. Barschke M, Uribe D, Ruiz OE, Jensen J, López C. Finite Element Modeling of Composite Materials using Kinematic Constraints. *Ing y Cienc*. 2009;5(10):133–53.
4. Bohórquez O, Parra SAA, Pertuz A, González-Estrada OA. Finite Element Analysis for Palm Oil Bunches Press Shaft Fractured in Service. *Key Eng Mater*. 2018; 774:191–6.
5. Bonilla O, Trujillo H, Guerra S, Hugo V, López C. Extracción y Caracterización de la fibra de la hoja de la Lengua de Suegra (*Sansevieria trifasciata*). *Rev Politécnica*. 2009; 30(1):167–78.
6. Car E, Oller S, Oñate E. Tratamiento Numérico de los Materiales Compuestos. Vol. 57, Monografía CIMNE No-57. 2000. 333 p.
7. Contreras M, Hormaza WA, Marañón A. Fractografía De La Fibra Natural Extraída Del Figue Y De Un. *Supl la Rev Latinoam Metal y Mater*. 2009; 1(1):57–67.

8. DiBenedetto AT. Tailoring of interfaces in glass fiber reinforced polymer composites: A review. *Mater Sci Eng A*. 2001; 302(1):74–82.
9. Dixit A, Mali HS, Misra RK. Unit cell model of woven fabric textile composite for multiscale analysis. *Procedia Eng* [Internet]. 2013; 68:352–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.191>.
10. García S. Fibras y Materiales De Refuerzo: Los Poliésteres Reforzados Aplicados a La Realización De Piezas En 3D. *Rev Iberoam Polímeros* [Internet]. 2011; 12(5):268–82. Available from: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/OCT11/garcia.pdf>
11. GENERACIÓN DE MODELOS DE MATERIAL COMPUESTO CON TEXGEN Y. 2017;
12. Gómez S, Ramón B, Guzman R. Comparative study of the mechanical and vibratory properties of a composite reinforced with fique fibers versus a composite with E-glass fibers. *Rev UIS Ing*. 2018; 13(1):43–50.
13. Jarzebski P, Wisniewski K, Wagner W. On Evaluation of Multithreaded FEM Code for Composite Shell Computations. *Pamm*. 2018; 17(1):315–6.
14. Jiménez MA, Castejón L, Miravete A. Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles Composite materials from new textile technologies. 1997; 47(c):83–91.

15. Latorre G, Vargas F. Materiales compuestos orgánicos utilizados como refuerzo. CTF Cienc Tecnol Futur [Internet]. 1999; 1(5):113–24. Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n5/v1n5a10.pdf>
16. Latorre G, Vargas F. Materiales compuestos orgánicos utilizados como refuerzo. CTF Cienc Tecnol Futur [Internet]. 1999; 1(5):113–24. Available from: <http://www.scielo.org.co/pdf/ctyf/v1n5/v1n5a10.pdf>
17. Lin H, Brown LP, Long AC. Modelling and Simulating Textile Structures Using TexGen. Adv Mater Res. 2011; 331:44–7.
18. López-Amo F, Pons JM. Método de ensayo para la determinación del módulo inicial de elasticidad de las fibras individuales. Ann Sci Text Belge [Internet]. 1995; 2:11. Available from: <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/6177/1/Article04.pdf>
19. Lucena MP, Suarez A, Zamudio I. Desarrollo De Un Material Compuesto a Base De Fibras De Bambu Para Aplicaciones Aeronauticas. Rev Latinoam Metal y Mater [Internet]. 2009;1(3):1107–14. Available from: www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html
20. Lucena MP, Suarez A, Zamudio I. Desarrollo De Un Material Compuesto a Base De Fibras De Bambu Para Aplicaciones Aeronauticas. Rev Latinoam Metal y Mater [Internet]. 2009;1(3):1107–14. Available from: www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html

21. Lynch JD. THE ROLE OF PLANTATIONS OF THE AFRICAN PALM (*ELAEIS GUINEENSIS* JACQ.) IN THE CONSERVATION OF SNAKES IN COLOMBIA Las plantaciones de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) y las poblaciones de serpientes en Colombia. *Caldasia* [Internet]. 2015; 37(1):169–82. Available from: <http://dx.doi.org/10.15446/caldasia.v37n1.50992> <http://ciencias.bogota.unal.edu.co/icn/publicaciones/>
22. Ma Y, Wu S, Zhuang J, Tong J, Xiao Y, Qi H. The evaluation of physio-mechanical and tribological characterization of friction composites reinforced by waste corn stalk. *Materials* (Basel). 2018; 11(6).
23. Mahajan G V, Aher VS. Composite material: A review over current development and automotive application. *Int J Sci Res Publ* [Internet]. 2012; 2(11):2250–3153. Available from: www.ijsrp.org
24. Martinez X, Oller S, Barbero E. Caracterización de la delaminación en materiales compuestos mediante la teoría de mezclas serie/paralelo. *Rev Int Metod Numer para Calc y Disen en Ing.* 2011; 27(3):189–99.
25. Mejía Almeida ME. Elaboración de tableros aglomerados autoadheridos a partir de fibra de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). 2012; 87.

26. Mittal V, Saini R, Sinha S. Natural fiber-mediated epoxy composites - A review. *Compos Part B Eng* [Internet]. 2016; 99:425–35. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.051>
27. Mittal V, Saini R, Sinha S. Natural fiber-mediated epoxy composites - A review. *Compos Part B Eng* [Internet]. 2016; 99:425–35. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.051>
28. Olutoge FA, Quadri HA, Olafusi OS. Investigation of the Strength Properties of Palm Kernel Shell Ash Concrete. *Technol Appl Sci Res*. 2012; 2(6):315–9.
29. Pickering KL, Efendy MGA, Le TM. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos Part A Appl Sci Manuf*. 2016; 83:98–112.
30. Proyecto P. Presentación del Proyecto “La palma africana en Colombia.” 1998; 10–2.
31. Quintana GC, Arroyave MS, Suárez DE. Obtención De Pulpa a Partir De Los Residuos De Palma Africana Pretratados Con Steam Explosion. *V Congr Iberoam Investig en Celul y Pap*. 2008; 1–8.
32. Ramos J. Carbono Unidireccional. 2008.

33. Reboul Corpa J. Modelización numérica del comportamiento de un material compuesto de tejido de fibra de carbono y matriz epoxi ante cargas dinámicas. 2012.
34. Reboul Corpa J. Modelización numérica del comportamiento de un material compuesto de tejido de fibra de carbono y matriz epoxi ante cargas dinámicas. 2012.
35. Salinas JGP, Salinas CFP, Miniguano CBC, M, Salvador, V, Amigo, A, Nuez, O, Sahuquillo, R, Llorens, F M, Jaramillo N, Hoyos D, et al. Caracterización De Fibras Vegetales Utilizadas Como Refuerzo En Matrices Termoplásticos. J Clean Prod [Internet]. 2017; 18(4):573–80. Available from: http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=116744595&lang=es&site=eds-live%0Ahttp://www.upv.es/VALORES/Publicaciones/CNM08_Fibras_naturales.pdf
36. Sanchez-Molina J, Alvarez-Rozo DC, Gelves-Díaz JF. Cisco de Café como posible material sustituto de arcilla en la fabricación de materiales cerámicos de construcción en el área metropolitana de Cúcuta. Respuestas. 2018; 23(1):27.
37. TALERO G, RINCÓN S, GONZÁLEZ A. Torrefacción de tusa y fibra de palma africana (*Elaeis guineensis*) procedente de los Llanos Orientales de and Fiber from the Colombian Eastern Plains . Measuring the Effect of Torrefaction Temperature on the Characteristics of Products. 2017; 38(1):27–47.
38. UNDP. Palm Oil Scoping Paper Part II (POSPII). 2010;(December):1–32.

39. UPM. Materiales Compuestos. Etsiae-Upm [Internet]. 2017;123–39. Available from: https://www.etsiae.upm.es/titulaciones/gia/plan_estudios/Asignaturas_16_17/CTA/14IA-GA-145006507-6S-2016-17-MtC.pdf%0Ahttps://www.etsiae.upm.es/titulaciones/gia/programacion_curso_gia_17_18.html
40. Vargas LEP, Laurance WF, Clements GR, Edwards W. The Impacts of Oil Palm Agriculture on Colombia's Biodiversity: What We Know and Still Need to Know. *Trop Conserv Sci*. 2016; 8(3):828–45.
41. Yan L, Kasal B, Huang L. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Compos Part B Eng* [Internet]. 2016; 92:94–132. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>
42. Yu J, Zhang T, Xu L, Huang P. Synthesis and Characterization of Aramid Fiber-Reinforced Polyimide/Carbon Black Composites and Their Use in a Supercapacitor. *Chinese J Chem*. 2017; 35(10):1586–94.