

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES COMPUESTOS
REFORZADOS CON FIBRAS DE LINO, YUTE Y FIQUE EN MATRIZ DE BASE
BIODEGRABABLE

JERSON STIVEN MELO REYES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2023

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES COMPUESTOS
REFORZADOS CON FIBRAS DE LINO, YUTE Y FIQUE EN MATRIZ DE BASE
BIODEGRABABLE

Jerson Stiven Melo Reyes

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

Alberto Pertuz Comas

Ph.D. Ingeniería mecánica

Codirector:

Juan Dayal Castro

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi madre Sandra y a mi padre Edulfo , por siempre apoyarme, por su amor incondicional y su confianza, les agradezco por enseñarme el valor del trabajo duro, la perseverancia y la importancia de la familia, gracias por apoyarme en cada una de mis decisiones y por estar a mi lado en los momentos difíciles; a mi amada hija Salome por llenar mi vida de alegría y felicidad, gracias por ser mi mayor motivación y por enseñarme a ser un mejor ser humano, eres mi mayor logro y estoy inmensamente orgulloso de ti; a mi amada Milady por ser mi compañera de vida, mi mejor amiga, mi confidente, por sus palabras de aliento para continuar hasta el final; a mi hermano Julián que siempre me ayudo en momentos difíciles; a mis amigos y compañeros de estudio; a todos infinitas gracias les agradezco de corazón.

Jerson Melo

AGRADECIMIENTOS

Al director de trabajo de grado, Alberto Pertuz, PhD. Por su orientación y disposición para realizar el trabajo.

A mi codirector ingeniero Juan Dayal Castro por su orientación, tiempo y ayuda en la resolución de dudas para este proyecto.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica por el préstamo de la maquina MTS para realizar ensayos.

Al laboratorio de microscopia de la Universidad Industrial de Santander - parque tecnológico Guatiguara, por su atención y colaboración.

CONTENIDO

Introducción.....	11
1. Objetivos.....	14
1.2 Objetivo General	14
1.3 Objetivos Específicos.....	14
2. Estado del Arte.....	15
2.1 Definición	15
2.1.1 clasificación.....	15
2.2.2 fibras de refuerzo	17
2.2 comportamiento mecánico en materiales compuestos.....	19
2.2.1. material anisotrópico	20
2.2.2. Material ortotrópico.	21
2.2.3. material transversalmente isotrópico	22
2.2.4. Material isotrópico	23
2.3 Fibras naturales.....	24
2.3.1 Fique	26
2.3.2 Yute	26
2.3.3 Lino.	27
2.4 Composición química y propiedades mecánicas de las fibras	28
2.5 Matrices en materiales bio-compuestos	30
2.6 Procesos de manufactura de materiales biocompuestos.....	32
3. Metodología.....	34
3.1 Selección de Materiales	34
3.2 Tratamientos químicos superficiales.....	35
3.3 Resinas empleadas como matrices de los biocompuestos.....	36
3.4 Fabricación de los Biocompuestos	37
4. Caracterización mecánica	41
4.1 Ensayo de tensión.	41
4.2 Resultados de las propiedades mecánicas a tensión de los Biocompuestos.....	42
4.2.1 Biocompuestos con fibra de Fique	42
4.2.2 Biocompuestos con fibra de lino	43

4.2.3 Biocompuestos con fibra de Yute.....	45
5. Análisis de la micro estructura de los biocompuestos.	47
6. Análisis de resultados	52
7. Homogenización numérica	54
7.1 Modelo del compuesto	54
8. Confrontación de propiedades de los compuestos obtenidos con lo encontrados en la bibliografía.....	61
9. Conclusiones.....	63
9. Recomendaciones.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades mecánicas de las fibras de vidrio y carbono</i>	18
Tabla 2 <i>composición química del fique, lino y yute</i>	29
Tabla 3 <i>Rango de propiedades mecánicas y humedad de cada fibra.</i>	30
Tabla 4 <i>Características del tratamiento químico</i>	35
Tabla 5 <i>Propiedades de la resina Biopoxy 36</i>	37
Tabla 6 <i>Esfuerzo de tracción y módulo de elasticidad en compuestos reforzados con fique.</i>	42
Tabla 7 <i>Esfuerzo de tracción y módulo de elasticidad en compuestos reforzados con lino</i>	43
Tabla 8 <i>Esfuerzo vs deformación para compuestos reforzados con yute.</i>	45
Tabla 9 <i>Parámetros de entrada</i>	56
Tabla 10 <i>Dominio de la matriz</i>	57
Tabla 11 <i>Propiedades de fibra y matriz (GPa).</i>	58
Tabla 12 <i>Constantes ingenieriles.</i>	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>solido continuo en estado de tension.</i>	19
Figura 2 <i>Material Ortotropico con 3 planos de simetría.</i>	21
Figura 3 <i>Ilustración de composición química en fibras.</i>	29
Figura4 <i>Probeta con orientación de fibra a (0°, 45°, 60°)</i>	34
Figura5 <i>Tratamiento Químico.</i>	36
Figura 6 <i>Material 100% curado.</i>	38
Figura 7 <i>probetas de yute a 0, 45 y 60°</i>	39
Figura 8 <i>probetas fique a 0, 45 y 60°</i>	39
Figura 9 <i>probetas de fique, lino y yute con epoxi</i>	39
Figura 10 <i>probetas de fique a 0, 45 y 60°</i>	39
Figura 11 <i>probetas de epoxi</i>	40
Figura 12 <i>probetas de biopoxy</i>	40
Figura 13 <i>Ensayo de tensión</i>	41
Figura 14 <i>Esfuerzo vs deformación para compuestos reforzados con Fique.</i>	42
Figura15 <i>Esfuerzo vs deformación para compuestos reforzados con Lino</i>	44
Figura 16 <i>Esfuerzo vs deformación para compuestos reforzados con yute.</i>	46
Figura 17 <i>muestras a observar y equipo utilizado.</i>	47
Figura 18 <i>Zona de fractura del biocompuesto fabricado con yute a escala micro y macro.</i>	47
Figura 19 <i>Dimension del diamtro y separacion entre fibras</i>	48
Figura 20 <i>Zona de fractura del biocompuesto fabricado con yute a escala micro y macro</i>	49
Figura 21 <i>Defecto superficial y dimesion del diamtro de la fibra.</i>	49
Figura 22 <i>Zona de fractura del biocompuesto fabricado con yute a escala micro y macro</i>	50
Figura 23 <i>Dimenension del diamtro de firba y distancia entre ellas.</i>	50
Figura 24 <i>modulo elástico de todos los materiales.</i>	52
Figura 25 <i>Esfuerzo de tracción de todos los materiales.</i>	52
Figura 26 <i>Modelado de tejido</i>	56
Figura 27 <i>Modelado del compuesto.</i>	57
Figura 28 <i>Grafica polar de variación de constantes ingenieriles en función del angulo</i>	59

RESUMEN

Título: Evaluación de las propiedades mecánicas en materiales compuestos reforzados con fibras de lino, yute y fique en matriz de base biodegradable

Autor: Jerson Stiven Melo Reyes

Palabras Clave: compuestos biodegradables, fibras naturales , caracterización mecánica.

Descripción :

El presente trabajo es una investigación realizada para conocer el comportamiento mecánico de materiales compuestos biodegradables reforzados con fibras de fique, lino y yute. Las fibras fueron sometidas a un tratamiento químico con hidróxido de sodio (NaOH) para mejorar la unión entre fibra y matriz. Se elaboraron muestras con la técnica de moldeo manual para cada tipo de fibra, variando su ángulo de orientación en 0°, 45° y 60°, se dimensionaron probetas como lo indica la norma ASTM D3039, cada una de estas fueron sometidas a ensayos de tracción para evaluar el efecto de las fibras en cada composición, teniendo en cuenta las propiedades mecánicas (Resistencia última y módulo de elasticidad).

Las fibras de fique, lino y yute mejoraron en gran parte la rigidez del material, aunque el esfuerzo a tracción de los materiales no se ve mejorado, esto debido a diversas razones las cuales fueron mencionadas en el capítulo de conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

Title: Evaluation of the mechanical properties of composite materials reinforced with flax, jute and fique fibers in a biodegradable matrix.

Author: Jerson Stiven Melo Reyes

Keywords: biodegradable compounds, natural fibers, mechanical characterization.

Description

The present work is an investigation carried out to determine the mechanical behavior of biodegradable composite materials reinforced with fique, flax and jute fibers. The fibers were subjected to a chemical treatment with sodium hydroxide (NaOH) to improve the bond between fiber and matrix. Samples were made with the manual molding technique for each type of fiber, varying its orientation angle in 0°, 45° and 60°, specimens were dimensioned as indicated in the ASTM D3039 standard, each of these were subjected to tensile tests to evaluate the effect of the fibers in each composition, taking into account the mechanical properties (ultimate strength and modulus of elasticity).

The fique, flax and jute fibers greatly improved the stiffness of the material, although the tensile strength of the materials is not improved, due to several reasons which were mentioned in the chapter of conclusions and recommendations.

Introducción

En los últimos años, ha habido un notable incremento en el uso de materiales poliméricos en diversas aplicaciones, impulsado por sus destacadas características frente a otros materiales. Estas ventajas incluyen su facilidad de procesamiento, la posibilidad de alcanzar altos niveles de productividad en su producción, su baja densidad y su costo reducido. Los materiales poliméricos abarcan una amplia variedad de compuestos, tanto naturales como sintéticos y su versatilidad y facilidad de manejo los hacen aptos para múltiples aplicaciones industriales (Velásquez y Peláez, 2016).

En la actualidad, es común la práctica de potenciar las propiedades de los materiales poliméricos al agregar partículas, tejidos o fibras con diversas características. De esta manera, se logra obtener materiales compuestos que poseen una matriz polimérica termoplástica (Araujo et al., 2008). Diversas investigaciones concuerdan en destacar las excelentes cualidades de las fibras naturales y los beneficios que aportan al ser empleadas como refuerzo en materiales compuestos (Ashori, 2008). Entre las ventajas, se destaca que provienen de recursos naturales lo cual facilita la disponibilidad, son biodegradables, de bajo costo y son muy livianas, una característica de gran interés es que presentan propiedades de refuerzo muy semejantes a las de fibras sintéticas convencionales como las fibras de vidrio o carbono (Carvalho, 2018). Su producción requiere de un bajo consumo eléctrico (Ku et al., 2011), lo cual lleva a menos emisiones en su cadena de producción. Además, al final de su vida útil, no es necesaria la combustión o la exposición a altas temperaturas (Safri et al., 2018), las fibras naturales tienen menor riesgo durante el proceso de producción y este es mucho más económico que el procesamiento de fibras sintéticas (Azwa et al., 2013).

El uso de fibras naturales se ha convertido en una respuesta a la necesidad de materiales compuestos sostenibles, los compuestos reforzados con fibras naturales han ganado atención entre las comunidades industriales y científicas dado que, en comparación con los compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras sintéticas, presentan problemas específicos como es su alta dependencia del petróleo y la gestión de residuos tras su fin de vida (Hidalgo-Salazar y Correa, 2018). Actualmente los compuestos de fibras naturales hechos de yute, sisal, cáñamo y lino se han involucrado cada vez más en varios campos ingenieriles como la fabricación de placas para circuitos, materiales de construcción y la elaboración de partes para vehículos entre otros, (John & Anandjiwala, 2008). Sin embargo, tiene algunas desventajas resaltables como su corta vida útil, la alta absorción de agua y humedad y su degradación a los rayos solares (Mohammed et al., 2015). Sin embargo, un desarrollo y estudio adecuado puede permitir que estos compuestos verdes surjan a nuevos mercados y alcancen una mayor demanda (Kiruthika, 2017).

Las fibras naturales se utilizan de diferentes formas: cortas, continuas y aleatoriamente orientadas, entre otras. Actualmente, Las fibras en presentación de tela tejida están ganando más interés debido a su excelente integridad y adaptabilidad para aplicaciones estructurales avanzadas (Rajesh & Pitchaimani, 2017). Algunos investigadores han demostrado las propiedades funcionales mejoradas de los compuestos con forma de tela tejida de refuerzo a partir de fibras naturales en comparación con una forma de refuerzo corta y orientada al azar (Venkateshwaran et al., 2011)

En el estudio de materiales amigables con el ambiente se busca que no solamente la fibra o el refuerzo sea de origen natural, sino que también su matriz tenga un alto porcentaje de base biológica, debido a que la mayor producción de materiales compuestos es hecha con matrices de base petroquímica. Es por esto por lo que han surgido nuevas investigaciones sobre la producción

de resinas naturales que se obtienen a partir de las plantas o alimentos orgánicos(Yıldızhan et al., 2018)

En la búsqueda de nuevos bio-compuestos reforzados con fibras naturales se generan expectativas y cuestionamientos como, ¿cuál de las fibras actúa como mejor refuerzo?, ¿cómo es el comportamiento de cada fibra? ¿hay gran variación de propiedades mecánicas de una fibra respecto a otra? Por lo que en esta investigación se busca profundizar el enfoque experimental de los compuestos reforzados con fibras naturales y así contribuir con el estudio de nuevos materiales biodegradables con fin de analizar y determinar cuál de las fibras que se tiene pensado utilizar como refuerzo presenta mejor respuesta mecánica.

1. Objetivos.

1.2 Objetivo General

Determinar propiedades mecánicas de un material bio-compuesto reforzado con fibras naturales de fique, lino y yute en una matriz de base biodegradable

1.3 Objetivos Específicos

Obtener mediante fabricación con moldeo manual los materiales compuestos con tres combinaciones de fibras, fique, lino y yute, cada una en la misma matriz de base biodegradable BioPoxy 36.

Determinar las propiedades mecánicas en tracción utilizando la norma ASTM D3039 del material compuesto reforzado con fibras de lino, yute y fique, con orientaciones de fibra de 0°, 90° y 60° respecto a la aplicación de la carga

Caracterizar la relación del comportamiento fibra matriz utilizando microscopía óptica y electrónica.

Contrastar las propiedades mecánicas obtenidas con los ensayos de tracción contra las encontradas en la bibliografía respecto a materiales compuestos sintéticos y biodegradables.

2. Estado del Arte

2.1 Definición

Definimos material compuesto como la combinación de dos o más materiales con el fin de obtener propiedades que no son alcanzables individualmente en cada uno de los materiales. Estos materiales compuestos constan de dos componentes principales: la matriz, que es la fase continua, y las fibras, que son la fase dispersa o reforzada (Gómez-suárez & Córdoba-tuta, 2022)

2.1.1 Clasificación

Existen diferentes formas de clasificar los materiales compuestos:

- Según el tipo de matriz que se utiliza
- Según la forma en la que se encuentra el refuerzo.

La clasificación de los materiales compuestos varía en función de su matriz, dividiéndose en poliméricos, cerámicos y metálicos, según su tipo.

- **Polimérica:** Las matrices orgánicas o poliméricas, comúnmente referidas como matrices plásticas, se distinguen por su baja densidad, elevada resistencia, excelente capacidad para resistir la corrosión, resistencia mecánica moderada, bajo costo y facilidad de moldeo rápido. Al utilizar este tipo de matriz, también es esencial considerar el impacto de las condiciones ambientales en el polímero, tales como la humedad, la temperatura y la radiación solar.

- **Cerámica:** Estas matrices tienen varias ventajas, tales como: dureza, alto límite de temperatura, inercia química y, lo más importante, baja densidad. Sin embargo, tienen baja

tenacidad a la fractura y tienden a fallar bajo presión e impacto. Las aplicaciones de sustratos cerámicos, como la alúmina, a menudo se refuerzan con carbono y silicio.

- **Metálica:** Se caracteriza por una mayor resistencia a los materiales compuestos, así como una buena rigidez y resistencia a la fractura. La naturaleza metálica de la matriz tiene una anisotropía ligeramente pronunciada y buen comportamiento a temperaturas elevadas. Sin embargo, este tipo de molde está limitado por su alta densidad, lo que también provoca algunas dificultades en su manejo y procesamiento.

Según la forma en que posea el refuerzo los materiales compuestos pueden clasificarse en compuestos reforzados por partículas, fibras y compuestos estructurales.

- **Reforzados por partículas:** Los materiales compuestos reforzados por partículas son aquellos que incorporan partículas sólidas, como nano partículas o micro partículas, en una matriz para mejorar sus propiedades mecánicas y funcionales. Estas partículas actúan como refuerzos, aumentando la resistencia, rigidez y resistencia al desgaste del material compuesto.

- **Reforzados por fibras:** Los materiales compuestos reforzados con fibras son reconocidos por su destacado rendimiento en términos de propiedades mecánicas y el valor añadido que aportan al producto final. El módulo de elasticidad de estos materiales no se ve afectado por su tamaño, ya que depende exclusivamente de la naturaleza de las fuerzas que

mantienen unidos a los átomos. Por otro lado, la resistencia mecánica varía en función de la forma de la muestra.

- **Estructurales:** Los materiales compuestos estructurales engloban una variedad de materiales, incluyendo compuestos y materiales homogéneos, cuyas características se ven afectadas tanto por los materiales que los componen como por la geometría estructural de los elementos. Dentro de las juntas estructurales, se pueden distinguir tres categorías principales: juntas estratificadas, estructuras sándwich y estructuras no estratificadas.

2.2.2 Fibras de refuerzo

Las fibras juegan un papel fundamental como elementos de refuerzo, ya que constituyen la parte principal del sistema compuesto encargado de soportar las cargas estructurales (Yıldızhan, Çalık, Özcanlı, et al., 2018). En la fabricación de estos materiales, se utilizan principalmente fibras sintéticas como agentes de refuerzo, siendo las de carbono, aramida y vidrio las más comúnmente empleadas. Sin embargo, debido a la creciente preocupación por los problemas ambientales y la sostenibilidad, se están intensificando los esfuerzos a nivel global para desarrollar soluciones efectivas que permitan la producción de materiales renovables y biodegradables para su aplicación en la industria manufacturera (Yıldızhan, Çalık, Özcanlı, et al., 2018).

Estas son las fibras sintéticas mas utilizadas:

- **Fibra de vidrio:** La fibra de vidrio es un tipo de material compuesto estructural que consiste en filamentos delgados de vidrio, también conocidos como hilos de fibra de vidrio, entrelazados para formar una estructura resistente. Estos filamentos de

vidrio se fabrican mediante la extrusión de vidrio fundido a través de orificios pequeños, lo que produce fibras continuas. La fibra de vidrio es ampliamente utilizada en diversas aplicaciones debido a su combinación de propiedades, que incluyen resistencia mecánica, rigidez, resistencia a la corrosión y baja densidad.

- **Fibra de carbono:** Las propiedades de la fibra de carbono la convierten en un material extremadamente resistente y liviano. Tiene una alta relación resistencia-peso, lo que significa que es muy resistente pero también muy ligera en comparación con otros materiales estructurales, como el acero. Esto la hace muy deseable en industrias donde la reducción de peso es importante, como la aeroespacial, la automotriz y la deportiva.

En la tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas de las fibras de vidrio y carbono.

Tabla 1

Propiedades mecánicas de las fibras de vidrio y carbono

Propiedades	Fibra de Carbono	Fibra de Vidrio
Resistencia a la tensión (MPa)	3900	103
Módulo de elasticidad (MPa)	230000	12411
Elongación (%)	1.5	0.5

Nota: Tomada de (Aperador et al., 2010)

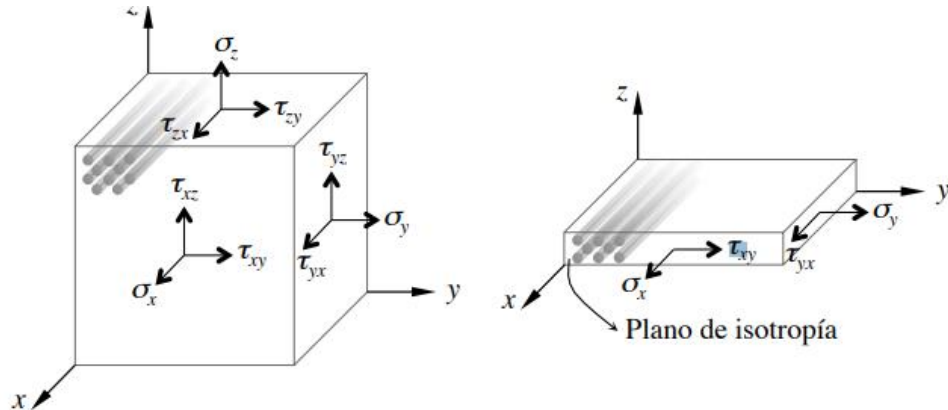
2.2 Comportamiento mecánico en materiales compuestos

El comportamiento mecánico en los materiales compuestos reforzados con fibras se ve afectado por la orientación de estas, dependiendo como estén dispuestas, el material puede mostrar comportamientos diferentes y pueden ser clasificados como anisótropos, ortótropos, transversalmente isotrópicos o isotrópicos (Gimeno et al., n.d.).

En el caso típico de un material sólido, el estado de tensión en un punto se describe mediante nueve componentes de tensión que actúan en las caras de un cubo, alineadas con los ejes x , y , z de un sistema de coordenadas de referencia (Jones, 1999).

Figura 1

Solido continuo en estado de tensión.



Nota: Tomada de (Onuaguluchi, 2016)

En situaciones de elasticidad lineal, cuando un material sólido experimenta deformaciones pequeñas, las tensiones y deformaciones se relacionan a través de la Ley de Hooke (Jones, 1999).:

Gracias a la simetría de los tensores de tensión y deformación ($\tau_{ij} = \tau_{ji}$ y $\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$), se puede reducir el número de componentes en el tensor constitutivo de cuarto orden de 81 a 36. En la notación ingenieril, la relación entre la tensión y la deformación se expresa de forma matricial de la siguiente manera (Jones, 1999)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

La matriz de rigidez, representada por C , y su inversa, la matriz de flexibilidad S , están relacionadas por la ecuación $C = S^{-1}$, lo que implica que $\varepsilon = S\sigma$. Como resultado, el estado de tensión o deformación en cada punto del sólido puede ser descrito mediante seis componentes.

2.2.1. Material anisotrópico

Los materiales anisotrópicos son aquellos que tienen propiedades físicas distintas en diferentes direcciones, esto significa que sus propiedades varían dependiendo de la orientación en la que se midan.

La ecuación (2) describe el comportamiento elástico más general, que describe la relación entre la tensión y la deformación de un material anisótropo. En este caso, el material anisótropo no presenta planos de simetría en relación con la alineación de sus fibras.

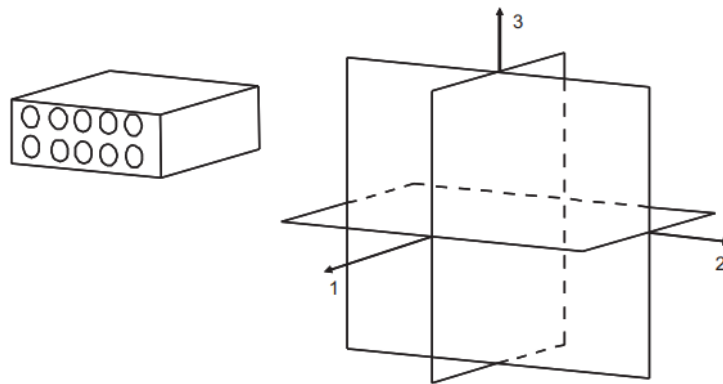
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

2.2.2. Material ortotrópico.

Un material ortótropo posee tres planos de simetría (Figura 4.4) que se alinean con los planos de coordenadas. En el caso de un material compuesto reforzado con fibras unidireccionales, puede considerarse ortótropo. Un plano de simetría es perpendicular a la dirección de la fibra, mientras que los otros dos pueden ser cualquier par de planos paralelos a la dirección de la fibra y mutuamente ortogonales. Para describir un material ortotrópico, solo se requieren nueve constantes. (Hasan & Rayyaan, 2014)

Figura 2

Material Ortotrópico con 3 planos de simetría



La ecuación que representa esta configuración es:

Material Ortotrópico (9 constantes independientes)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

2.2.3. Material transversalmente isotrópico

Un material transversalmente isótropo tiene un eje de simetría. Por ejemplo, la dirección de las fibras de un material compuesto unidireccional reforzado con fibras se puede considerar un eje de simetría si las fibras se distribuyen aleatoriamente en la sección transversal. En este caso, cualquier plano que contenga la dirección de la fibra es un plano de simetría. Un material transversalmente isótropo se describe mediante cinco constantes (Hasan y Rayyaan, 2014).

Ecuación que describe el comportamiento de material transversalmente Isotrópico (5 constantes independientes)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

2.2.4. Material isotrópico.

Los materiales más utilizados en la industria son isotrópicos, como el aluminio, el acero, entre otros. Estos materiales presentan un número ilimitado de planos de simetría, lo que implica que sus propiedades no dependen de la orientación. Para representar las propiedades elásticas de estos materiales, solo se requieren dos constantes (Jones, 1999).

Ecuación de un material isotrópico (2 constantes independientes)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2_S & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2_S & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Los materiales biocompuestos están conformados por una matriz que generalmente es una resina o un polímero con un porcentaje de material biodegradable, la cual envuelve un refuerzo de fibras naturales que pueden ser de origen animal, vegetal o mineral. Estas fibras tienen un gran impacto en la resistencia general de dichos materiales y se convierte en una alternativa a considerar para aprovechar los residuos agroindustriales, se ha evaluado el

desempeño de este material, mostrando que es posible aumentar tanto las propiedades mecánicas y térmicas, como la biodegradabilidad del compuesto (Elfehri Borchani et al., 2015)

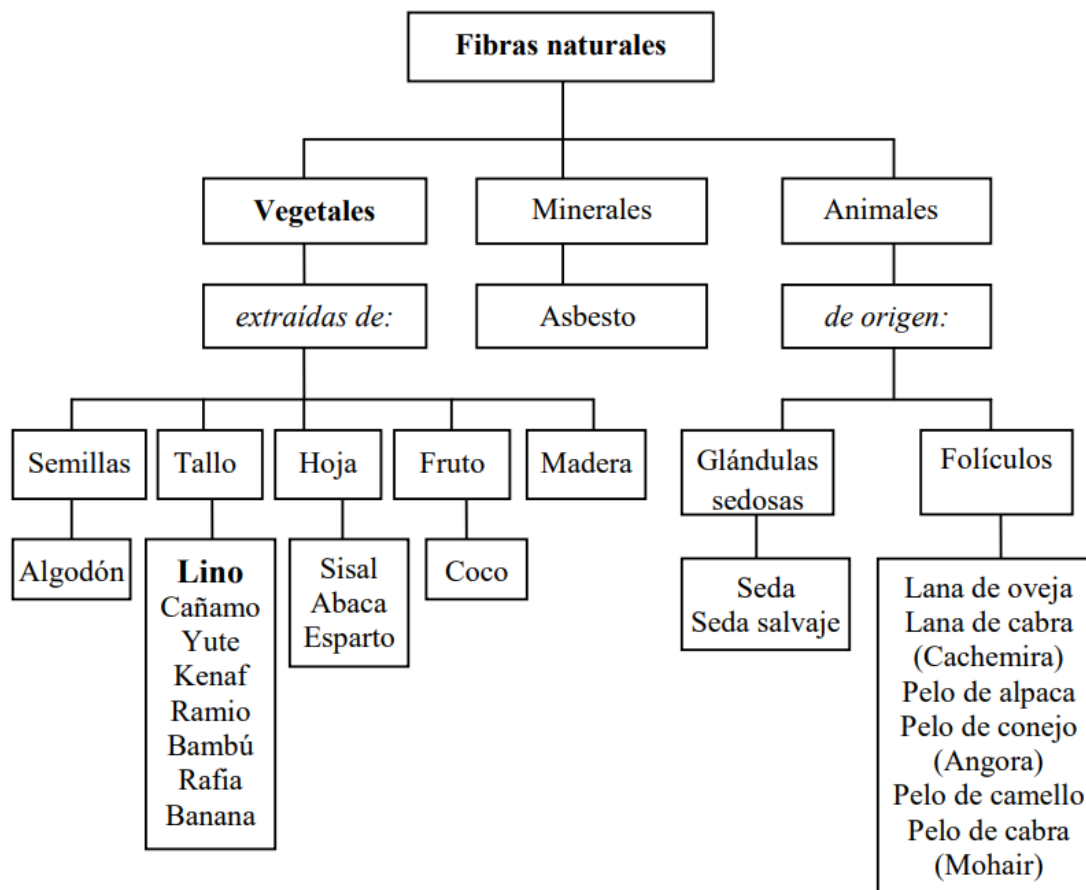
2.3 Fibras naturales

Un biocompuesto es un material que se compone de una mezcla entre fibras naturales, con propiedades biodegradables, y una matriz derivada de un polímero también biodegradable.

Se conoce como fibra natural a las fracciones de hebras o pelo cuyo origen está en la naturaleza y se clasifican generalmente en tres ramas: las de origen animal, las derivadas de minerales y las de origen vegetal. Las fibras de origen animal abarcan las proteínas específicas, incluyendo la seda, fibra capilar, lana. Por otro lado, las fibras derivadas de minerales incluyen el asbesto, mientras que las de origen vegetal comprenden el lino, yute, algodón, cáñamo, fique, entre otras (Onuaguluchi, 2016). Según la parte de la planta de donde son extraídas se puede encontrar diferentes variedades, siendo clasificadas en fibras de: estera (por ejemplo, cáñamo, yute, kenaf y el lino), hojas (piña, fique y plátano), tallos (bambú, caña y hierba) y semillas (algodón, fibra de coco y otras) (Jawaid & Abdul Khalil, 2011).

Figura 3.

Clasificación de fibras naturales



Nota: Tomada de (Díaz Escriche, 2012)

El uso de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos ofrece diversas ventajas en comparación con las fibras sintéticas. Estas ventajas incluyen una menor densidad, costos más bajos, disponibilidad abundante, capacidad de renovación, resistencia a la corrosión y biodegradabilidad. (Muñoz et al., 2014). No obstante, también hay algunas desventajas asociadas al uso de fibras naturales en materiales compuestos. Una de ellas es la dificultad de lograr una buena compatibilidad entre las fibras y la matriz debido a las características hidrofílicas de las fibras y la hidrofobicidad de la matriz. Esta falta de compatibilidad puede tener un impacto directo en las propiedades mecánicas del compuesto. (Ovalle-Serrano et al., 2018)

Las fibras que se utilizaran en este trabajo de investigación serán el fique, yute y lino.

2.3.1 Fique

El fique es una fibra natural originaria de Colombia, cultivada principalmente en los departamentos de Cauca, Nariño, Santander y Antioquia (Muñoz et al., 2014). La fibra se extrae de la hoja mediante técnicas mecánicas y se utiliza principalmente en sacos y cuerdas, en su proceso de elaboración es posible obtener diversas presentaciones, desde fibras cortas hasta mallas de diferentes pesos y texturas. (Hidalgo-salazar & Correa, 2018)

Se caracteriza por su baja densidad, alta resistencia al desgaste, flexibilidad y excelente degradación térmica (Castellanos et al., 2012). Razones por la cual esta fibra ha llegado a ser implementada en compuestos de matriz polimérica para aplicaciones aeronáuticas, e industrias automovilísticas.

2.3.2 Yute

El yute es una fibra natural ampliamente utilizada en diversas aplicaciones debido a sus propiedades y características únicas. Se obtiene de la planta de yute (*Corchorus spp.*), que es nativa de regiones tropicales y subtropicales (Azwa et al., 2013).

En la actualidad, el uso de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos es ampliamente utilizado. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas fibras presentan

ciertos inconvenientes que pueden afectar su rendimiento. Para superar estos desafíos, se requiere realizar una modificación química que permita mejorar la humectación de las fibras y promover una mejor interacción con la matriz del material compuesto. De esta manera, se logra maximizar el potencial de las fibras naturales como refuerzo.(Rana & Jayachandran, 2006).

La fibra de yute exhibe una deformación elástica antes de la rotura que oscila entre el 1% y el 1.8% de su longitud inicial. Además, su tenacidad es comparable a la del acero. Cabe destacar que otras características mecánicas, como la flexión y la torsión, son significativamente superiores en comparación con otras fibras naturales debido a la naturaleza del tallo del yute y sus propiedades inelásticas.(Ii, 2002)

2.3.3 Lino.

El lino es una de las materias primas textiles más antiguas conocidas y cultivada durante siglos, su nombre científico es *linum usitatissimum* (Díaz Escriche, 2012). El lino es conocido por ser una fibra muy resistente y duradera. Es considerada una de las fibras naturales más fuertes, lo que la hace adecuada para una variedad de aplicaciones textiles. Las fibras de lino son lisas y uniformes, lo que le confiere una apariencia y textura distintivas a los productos hechos con esta fibra. Una de las propiedades destacadas del lino es su capacidad de absorción de humedad. Es capaz de absorber hasta un 20% de su peso en agua, lo que lo hace cómodo de usar en climas cálidos, ya que ayuda a mantener una sensación de frescura y transpirabilidad.

Esta fibra ha sido utilizada como refuerzo en hormigones y morteros, ya sea dentro de la matriz como fibras cortas o como un recubrimiento externo en forma de tejidos, dado que presenta una alta resistencia a la tensión (Yan et al., 2014). La fibra de lino tiene una mejor resistencia a la tracción específica en comparación con la fibra de vidrio, además tiene baja densidad, alta resistencia y rigidez(Kobayashi et al., 2014).

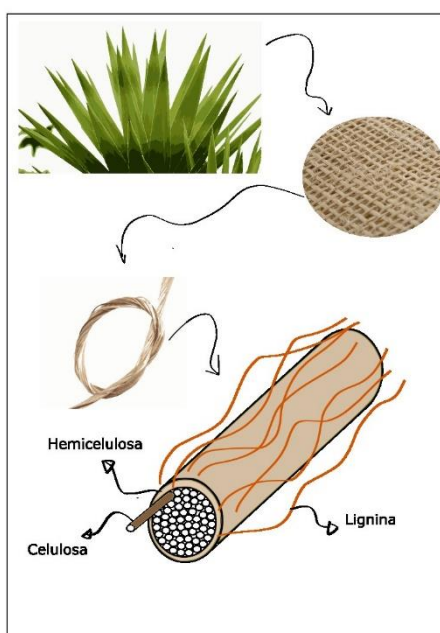
2.4 Composición química y propiedades mecánicas de las fibras

Las fibras naturales están compuestas principalmente por celulosa, lignina, pectina y hemicelulosa. La celulosa es el componente estructural más importante en la mayoría de las fibras naturales, y se encuentra en forma de microfibrillas cristalinas alineadas a lo largo de la fibra. Esta orientación paralela de las microfibrillas en relación con el eje de la fibra contribuye significativamente a su rigidez y resistencia a la tracción. (John & Thomas, 2008). Posee una alta resistencia a la hidrólisis y a agentes oxidantes, aunque puede experimentar una degradación parcial al ser expuesta a ácidos fuertes (*Green Composites from Natural Resources - Google Libros*, n.d.). La hemicelulosa, que recubre las microfibrillas de celulosa, es una estructura compuesta por cadenas lineales ramificadas de polisacáridos de peso molecular inferior. Esta hemicelulosa facilita la unión de las fibras de celulosa con la pectina. La presencia de hemicelulosa contribuye a la absorción de humedad, la biodegradación y la degradación térmica, mientras que la lignina es responsable de la degradación causada por la radiación ultravioleta. La lignina también aporta rigidez a la fibra. (Faruk et al., 2012).

La lignina se forma cuando varios alcoholes fenilpropanoides se unen, y su principal función es brindar rigidez a la pared celular, lo que le confiere resistencia tanto al impacto como a la flexión. Además, la lignina muestra una resistencia notable a la hidrólisis ácida, aunque es fácilmente oxidada. La presencia de lignina en los tejidos desempeña un papel crucial al proporcionar una mayor resistencia ante posibles ataques de microorganismos (John & Thomas, 2008).

Figura 3

Ilustración de composición química en fibras.



El contenido de celulosa, lignina, pectina y hemicelulosa en las fibras vegetales tiene un impacto en sus propiedades. Con frecuencia, se elimina la lignina y la pectina como una práctica habitual para mejorar el efecto de refuerzo de las fibras naturales (Dittenber & Gangarao, 2012).

En la tabla 4 se expone los porcentajes de composición química de las fibras de fique, lino y yute

Tabla 2

composición química del fique, lino y yute.

fibra	celulosa (% en peso)	hemicelulosa (% en peso)	lignina (% en peso)	ceras (% en peso)
fique	57 - 73,8	17 - 26	10,1 - 21	5
lino	70 - 73	18,6 - 20,6	2 - 2,2	1,5 - 1,7
yute	33,4 - 71	14 - 22,7	12 - 15	0,5

Nota: tomada de (Moriana et al., 2014)

Las propiedades mecánicas de las fibras tienen un impacto directo en el rendimiento mecánico del compuesto. La composición química de las fibras desempeña un papel crucial en estas propiedades. La degradación de la lignina y la hemicelulosa en las fibras contribuye al aumento del grado de separación entre las fibras, lo que favorece la orientación de las microfibrillas en la dirección de la deformación. Esto mejora la tenacidad del compuesto al permitir una mayor absorción de energía (Tan et al., 2010).

Tabla 3

Rango de propiedades mecánicas y humedad de cada fibra.

Tipo de fibra	Resistencia a tracción (Mpa)	Módulo de Young (Gpa)	Elongación ultima (%)	Densidad (g/cm ³)	Humedad (%)
Fique	43 - 571	5,7 - 24,06	9,8	0,72	7,71 - 12
lino	345 - 1035	27,6 - 58,6	2,7 - 3,2	1,5	7,7
yute	200 - 773	20 - 55	1,5 - 1,8	1,3	12

Nota: tomada de (Ali et al., 2018)

2.5 Matrices en materiales bio-compuestos

En la fabricación de materiales compuestos se utilizan varias matrices, como metales, cerámicos y polímeros. De estos, los polímeros son los más comúnmente empleados para crear materiales compuestos biocompatibles que se refuerzan con fibras naturales.

Las matrices poliméricas se pueden dividir en: termoplásticas, termoestables y bio-bases.

Termoestables: Una matriz polimérica termoestable es un tipo de material polimérico que es capaz de retener su forma y propiedades mecánicas a altas temperaturas. Estos polímeros están diseñados para tener una estabilidad térmica mejorada en comparación con los polímeros convencionales, lo que los hace adecuados para una amplia gama de aplicaciones en las que se requiere resistencia al calor(Escudero López, 2001). Ejemplos de matrices poliméricas termoestables incluyen resinas epoxi, resinas fenólicas, resinas de bismaleimida (BMI) y resinas de poliimida.

Termoplásticas: Las matrices termoplásticas se vuelven plásticas y deformables con la temperatura, son empleadas para aplicaciones concretas por su fácil cambio de forma, tienen una alta deformación, alta resistencia al impacto y a la fractura(Escudero López, 2001). Algunos ejemplos comunes de matrices poliméricas termoplásticas incluyen el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliéster (PET), el polimetilmetacrilato (PMMA) y el policarbonato (PC).

Bio-bases: Un material polimérico basado en fuentes biológicas es un tipo de polímero que se produce a partir de recursos renovables, como biomasa, plantas, algas u otros materiales biológicos. Estos polímeros son considerados más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente en comparación con los polímeros tradicionales que se obtienen de fuentes no renovables, como el petróleo. Algunos ejemplos comunes de polímeros basados en fuentes biológicas incluyen el políácido láctico (PLA), el polihidroxibutirato (PHB) y el polietileno de baja densidad (LDPE) derivado de la caña de azúcar, entre otros ejemplos.

2.6 Procesos de manufactura de materiales biocompuestos

Estos son los procesos de manufactura más utilizados para materiales biocompuestos.

Pultrusion: Es un proceso donde se impregnan fibras continuas con una matriz que habitualmente es termoestable, luego se estira y se pasa por una matriz que le da la forma y donde se realiza el curado, finalmente se realiza el corte con la longitud requerida. Tanto la velocidad con la que se alimentan las fibras, como la temperatura de la matriz son las principales variables que afectan a las propiedades del compuesto (Faruk et al., 2012).

Hand Lay-Up o moldeo manual: El proceso de moldeo manual, comienza aplicando una sustancia antiadherente en el molde para facilitar la liberación del material compuesto una vez que haya completado el curado. Luego, se distribuye una capa de matriz para asegurar que las fibras se mantengan en su lugar durante el moldeo. A continuación, se añade una capa de refuerzo compuesta por fibras naturales y se agrega más resina. Este proceso se repite con varias capas hasta alcanzar el grosor deseado. Finalmente, los composites se curan a temperatura ambiente o mediante el uso de un horno, dependiendo de los requisitos específicos (Gómez-suárez & Córdoba-tuta, 2022).

Infusión al vacío: La infusión al vacío es una técnica de fabricación de materiales compuestos que implica impregnar una fibra de refuerzo con una resina líquida en un molde cerrado. Se aplica vacío para extraer el aire y permitir que la resina fluya y se infiltre en las fibras de refuerzo de manera uniforme. Este proceso ofrece ventajas como una distribución uniforme de

la resina, alta resistencia y la capacidad de producir piezas de formas complejas. Además, reduce el desperdicio de resina y permite utilizar una variedad de fibras y resinas según las necesidades de la aplicación (Gómez-Suarez & Córdoba-Tuta, 2022).

Moldeo por Inyección: En este proceso de fabricación se utiliza polímero termoplástico mezclado con fibras naturales (que son cortas), posteriormente se aumenta la temperatura fundiendo el polímero e inyectándolo en un molde, una vez enfriado el compuesto, se expulsa la pieza fabricada (Gómez-Suarez & Córdoba-Tuta, 2022).

3. Metodología

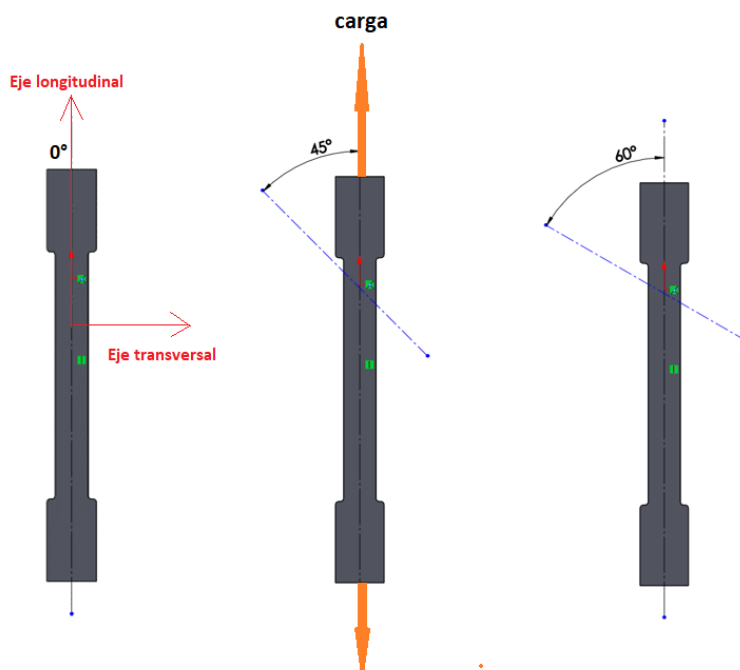
3.1 Selección de Materiales

Para llevar a cabo el trabajo de investigación se hizo necesario la obtención de los siguientes materiales: Fibra tejida de fique, fibra tejida de yute, fibra tejida de lino, bio-resina (biopoxy 36) y resina epoxica para fibra. El fique fue suministrado por la empresa cohilados del fonce – San Gil, el yute fue adquirido en el vivero el bosque- Bucaramanga y la fibra de lino fue importada y suministrada por la empresa Easy Composites.

Las fibras de cada especie fueron orientadas en ángulos de 0° , 45° y 60° respecto a la carga y luego fueron ser sometidas a un tratamiento químico.

Figura4

Probeta con orientación de fibra a (0° , 45° , 60°)



3.2 Tratamientos químicos superficiales

Las fibras fueron sometidas a un proceso de alcalinización o mercerización , este tratamiento químico es uno de los más utilizados para tratar fibras naturales utilizadas como refuerzos en materiales termoplásticos y termo estables(Li et al., 2007). Lo que se busca obtener con el tratamiento es eliminar cierta cantidad de lignina, cera y aceites que cubren la superficie externa de la pared celular de la fibra, y así mejorar la unión entre fibra y matriz con el fin de obtener mejores propiedades para el material(Mohanty et al., 2001).

En el tratamiento alcalino las fibras se sumergen en una solución de NaOH durante un periodo de tiempo determinado, posteriormente son lavadas con agua destilada para así dejarlas en un proceso de secado(Ray et al., 2001)

En la siguiente tabla se resume las principales características del tratamiento realizado a cada fibra.

Tabla 4

características del tratamiento químico

Tipo de fibra	concentración recomendada de (NaOH)	concentración usada de (NaOH)	Tiempo del tratamiento	Tiempo de secado	Referencia
Fique	2% P/V	2% P/V	1 hora	24 horas	(Muñoz et al., 2014)
Lino	2% a 5% P/V	2% a 5% P/V	1/2 hora	24 horas	(Wang et al., 2007)
Yute	5% P/V	5% P/V	1 Hora	24 horas	(Rohit & Dixit, 2016)

Figura5
Tratamiento Químico.



3.3 Resinas empleadas como matrices de los biocompuestos

Las matrices utilizadas para la fabricación de los materiales biocompuestos, fueron una termo estable y una biobase.

- **Biobase:** la resina biobase utilizada como matriz fue Biopoxy 36, esta fue importada y suministrada por la empresa Ecopoxy, la resina contiene un 36% de contenido de carbono de base biológica según el fabricante. El porcentaje de resina : catalizador fue 4 : 1 en volumen. En la tabla 6 se observa un resumen de las propiedades de la biobase

Tabla 5

propiedades de la resina Biopoxy 36

Propiedades	Unidades
Esfuerzo de tracción	57.9 (Mpa)
Módulo de tensión	2.83 (Gpa)
Esfuerzo de flexión	97.1 (Mpa)
Módulo de flexión	2.94 (Gpa)
Tiempo estimado de curado	72 Horas a 25°C

Nota: datos tomados por el fabricante.

- **Termoestable:** La resina epoxi sintética fue suministrada por la empresa Sumiglas. El porcentaje de resina : catalizador fue de 100 : 88 en peso.

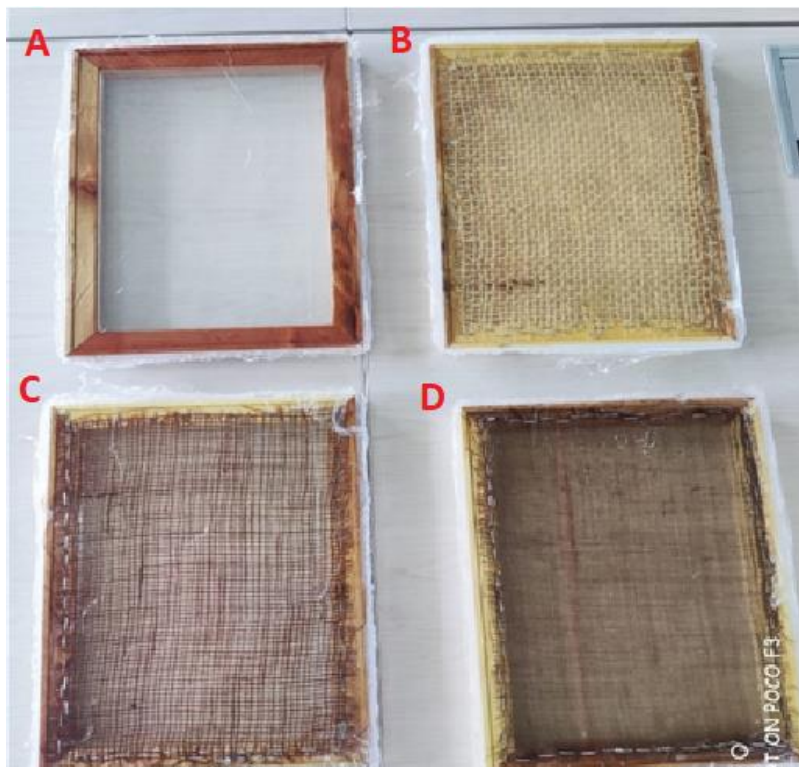
3.4 Fabricación de los Biocompuestos

Los biocompuestos fueron manufacturados por medio de la técnica de moldeo manual con particularidades propias del proceso. Con los moldes ya listos y fijos sobre una superficie de vidrio, se procede a verter el volumen requerido de biobase y resina Epoxi, esparciéndolas bien sobre toda la superficie tratando de eliminar los defectos porosos y las burbujas o espacios con aire. Biopoxy 36 es una resina termoendurecible, lo que significa que al ser preparada genera una reacción exotérmica generando calor a medida que se cura. El tiempo de curado para los biocompuestos fabricados con biobase fue de 72 horas, para las muestras con epoxi el tiempo de curado fue de 36 horas siguiendo las recomendaciones de los fabricantes.

En la figura 5 se observa los materiales con su tiempo de curado completo.

Figura 6

Material 100% curado.



Nota: (A) epoxi, (B) epoxi + fique, (C) epoxi + yute, (D) epoxi + lino.

Con el material ya curado, se procede a cortar y dimensionar las probetas con la siguiente geometría: 250 ± 5 mm de largo por 25 ± 3 mm de ancho por 3 ± 2 mm de grosor, conforme a la norma ASTM D3039/D3039M (ASTM Committee D30, 2017). De cada configuración se obtuvieron 5 probetas para ser ensayadas.

En las siguientes figuras se muestra una muestra de cada configuración, en total entre compuestos con resina biopoxi 36 y epoxi se manufacturaron 70 probetas.

Figura 8
probetas fique a 0, 45 y 60°



Figura 7
probetas de yute a 0, 45 y 60°



Figura 10
probetas de fique a 0, 45 y 60°



Figura 9
probetas de fique, lino y yute con epoxi



Figura 12
probetas de biopoxy



Figura 11
probetas de epoxi



4. Caracterización mecánica

4.1 Ensayo de tensión.

Se llevó a cabo el ensayo de tensión conforme a la normativa ASTM D3039/D3039M utilizando una máquina universal MTS modelo 370.02 Bionix con una capacidad de 25KN. La prueba se realizó a una velocidad de 2mm/min. Se ensayaron cinco probetas para cada material, y se calculó el promedio de cada propiedad. La figura 10 muestra el sistema utilizado durante el ensayo.

Figura 13
Ensayo de tensión



4.2 Resultados de las propiedades mecánicas a tensión de los Biocompuestos

En esta sección se detallan los valores obtenidos del ensayo de tracción para cada configuración, agrupándolos por el tipo de fibra.

4.2.1 Biocompuestos con fibra de Fique

Tabla 6

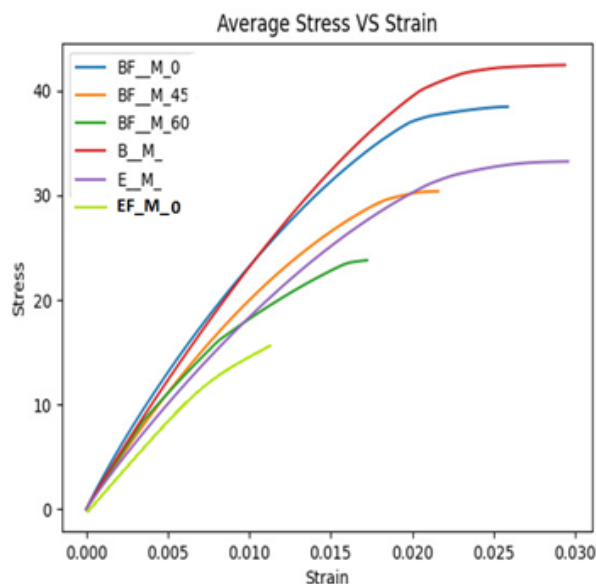
Esfuerzo de tracción y módulo de elasticidad en compuestos reforzados con fique.

Material	Tracción (MPa)				
	Esf.max (prom)	Dv.Estandar	Módulo	Dv.Estandar	Elongación (%)
Fique	43 - 571	----	1880	----	1.3
Biopoxy 36	42.4	1.84	2475.2	123.2	2.86
Epoxi	33.2	3.34	2022.4	202.9	2.91
Fique a 0°+ Biopoxy	37.5	1.75	2559.3	346.7	2.52
Fique a 45°+ Biopoxy	30.4	2.49	2275.7	138.1	2.21
Fique a 60° + Biopoxy	23.8	10.35	2388.6	135.7	1.72
Fique a 0° + Epoxi	16.2	2.97	981.8	165.6	1.38

Nota: Las propiedades para la fibra de fique fueron tomadas de (Muñoz et al., 2014).

Figura 14

Esfuerzo vs deformación para compuestos reforzados con Fique.



Dónde: BF_M_0 = Fique a 0°+ Biopoxy

BF_M_45 = Fique a 45°+ Biopoxy

BF_M_60 = Fique a 60° + Biopoxy

B_M_ = Biopoxy 36

E_M_ = Epoxi

EF_M_0 = Epoxi + Fique

La tabla 7 nos muestra los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción de los compuestos reforzados con fique-biopoxy, solo biopoxy y epoxica sintética. En la figura 11 se muestra la curva de esfuerzo - deformación de cada compuesto. El compuesto de Biopoxy + Fique a 0° presentó un esfuerzo máximo promedio a tensión de 37.5 MPa, al compararlo con el Biopoxy 36 con un esfuerzo máximo promedio de 42.5 MPa, evidenciamos que al incorporar el refuerzo su resistencia a la tracción se ve afectada, disminuyendo un 11.76%. Aun así, se puede deducir que al incorporar el refuerzo al material su módulo elástico aumenta ganando un 3.4% de rigidez. El compuesto Biopoxy + Fique 60° presento un esfuerzo máximo de 23.8 MPa con una desviación estándar de 10.35MPa, una desviación estándar grande indica que hay una mayor incertidumbre en los datos y puede afectar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

4.2.2 Biocompuestos con fibra de lino

Tabla 7

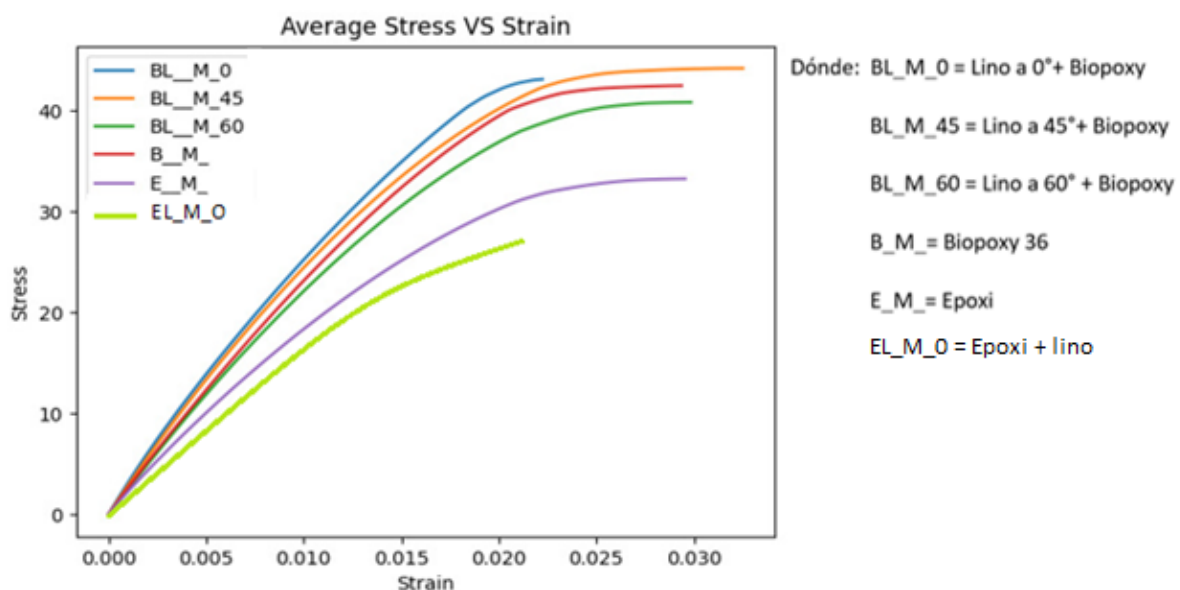
Esfuerzo de tracción y módulo de elasticidad en compuestos reforzados con lino.

Material	Tracción (Mpa)				
	Esf.max (prom)	Dv.Estándar	Módulo	Dv.Estanadar	Elongación (%)
Lino	343-1035	----	2760	-----	1.2 - 3
Biopoxy 36	42.4	1.84	2475.2	123.2	2.86
Epoxi	33.2	3.34	2022.4	202.9	2.91
Lino a 0°+ Biopoxy	43.07	1.27	2815.7	116.1	2.41
Lino a 45° + Biopoxy	44.16	4.03	2709.4	334.6	3.25
Lino a 60° + Biopoxy	40.8	2.85	2410.4	114.2	2.95
Lino a 0° + Epoxi	27.8	1.3	1713.7	166.5	2.12

Nota: Las propiedades mecánicas del lino fueron tomadas de (Yıldızhan, Çalık, Özcanli, et al., 2018)

Figura15

Esfuerzo vs deformación para compuestos reforzados con lino



La tabla 8 nos muestra los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción de los compuestos reforzados con lino, solo biopoxy y epoxica sintética. En la figura 12 se muestra la curva de esfuerzo - deformación de cada compuesto. El compuesto Lino a 45° + Biopoxy presento un esfuerzo máximo promedio de 44.16 MPa, al compararlo con Biopoxy 36 se evidencia que el refuerzo aumento la resistencia del material un 4.2% asimismo logro que el material aumentara su rigidez un 13.8% Para compuestos con matriz epoxi se evidencia que al incorporar el lino como refuerzo su esfuerzo disminuye un 16%. El compuesto con más

porcentaje de elongación fue Lino a 45° + Biopoxy registrando un 3.25% de elongación. El compuesto Lino 0°+ Biopoxy es un 5.7% más resistente que el compuesto fique 60° + Biopoxy.

4.2.3 Biocompuestos con fibra de Yute

Tabla 8

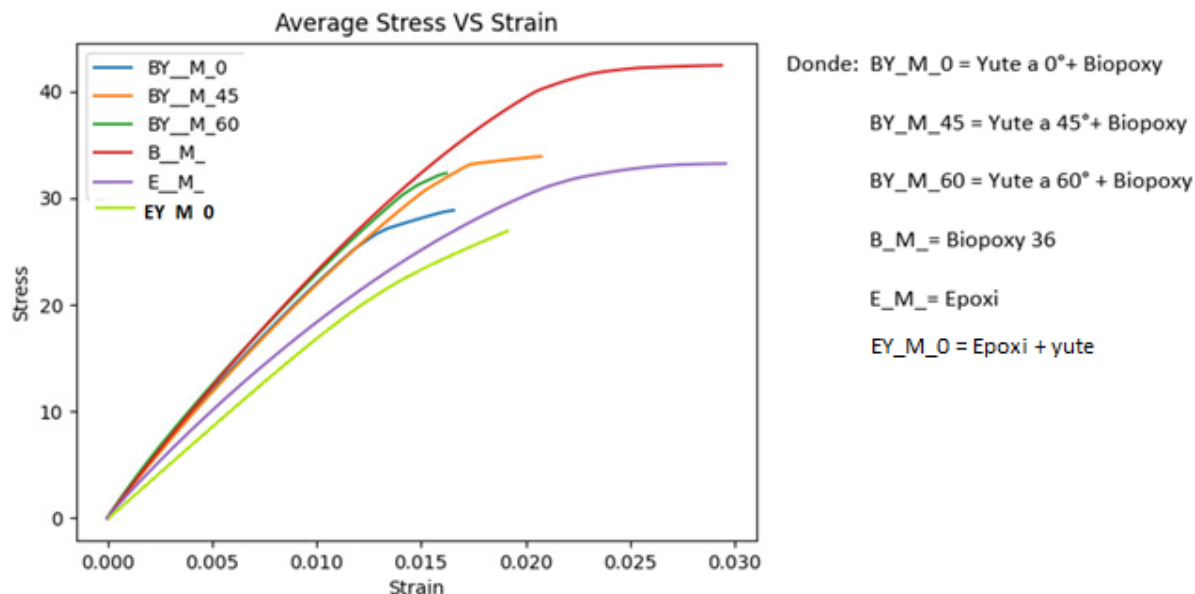
Esfuerzo vs deformación para compuestos reforzados con yute.

Material	Tracción (Mpa)				
	Esf.max (prom)	Dv.Estandar	Módulo	Dv.Estandar	Elongación(%)
Yute	200 - 773	-----	2000	----	1.5 -1.8
Biopoxy 36	42.4	1.84	2475.2	123.2	2.86
Epoxi	33.2	3.34	2022.4	202.9	2.91
Yute a 0°+ Biopoxy	28.8	4.99	2403.4	241.2	1.65
Yute a 45° + Biopoxy	33.9	2.02	2381.2	52.8	2.19
Yute a 60° + Biopoxy	32.3	2.13	2522.2	209.8	1.63
Yute a 0° + Epoxi	28.7	0.81	2191.9	107.5	1.85

Nota: Las propiedades mecánicas del yute fueron tomadas de(Niedermann et al., 2015)

Figura 16

Esfuerzo vs deformación para compuestos reforzados con yute.



La tabla 9 nos muestra los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción de los compuestos reforzados con lino, solo biopoxy y epoxica sintética. El compuesto Yute a 45° + Biopoxy registro un esfuerzo máximo promedio de 33.9MPa siendo el más alto de los compuestos reforzados, pero al ser comparado Biopoxy 36 se evidencia que al incorporar le refuerzo su esfuerzo máximo a tracción disminuye un 20%. De igual manera se evidencia que la fibra aporta rigidez al material en este caso la fibra orientada a 65° presenta una mejora de un 3% respecto al módulo elástico. Para este tipo de fibra se evidencia que la configuración yute 0° + Biopoxy registro un esfuerzo de 28.8MPa siendo el menor de todas las configuraciones reforzadas. Se evidencia que al incorporar fibra de yute longitudinalmente esta mejora en un 8.5 % su rigidez.

5. Análisis de la micro estructura de los biocompuestos.

Para el análisis microscópico se hizo necesario la preparación de las muestras, cortando así en la zona de ruptura y una sección transversal para cada probeta, posteriormente fueron lijadas y pulidas para ser montadas y observadas bajo un microscopio óptico tipo Zeiss AXIO Imager.M1. La microscopia fue realizada en el laboratorio de microscopia UIS Guatiguara.

Figura 17

muestras a observar y equipo utilizado.



Una vez obtenidas las imágenes se puede analizar diversos parámetros, como la distancia entre fibras, el diámetro y la presencia de defectos.

Figura 18

Zona de fractura del biocompuesto fabricado con yute a escala micro y macro.



fragilidad de la resina. Con la figura 19 podemos apreciar el diámetro promedio de la fibra de $719.6\ \mu\text{m}$ y separadas entre si a una distancia de $2007.16\ \mu\text{m}$.

Figura 20

Zona de fractura del biocompuesto fabricado con yute a escala micro y macro



Figura 21

Defecto superficial y dimesión del diámetro de la fibra.



En la figura 18 podemos evidenciar un tipo de fractura muy similar al caso anterior, la fractura se presenta en una fibra transversal, también podemos ver defectos como zonas huecas (ver figura 21) provocadas por burbujas de aire. La zona hueca tiene un diámetro aproximado de $1143.3\ \mu\text{m}$, defectos como este debilitan la estructura del material y reducen su resistencia. Al igual que el compuesto fique-biopoxy, se observa que la zona de falla coincide con una fibra transversal. Al igual que con el fique-biopoxy, las zonas cerca a las fibras se muestran no

uniformes. Las fibras de yute tienen un diametro promedio de $450.15\ \mu\text{m}$ y estas se encuentran separadas a una dsitancia de $1395.37\ \mu\text{m}$.

Figura 22

Zona de fractura del biocompuesto fabricado con yute a escala micro y macro

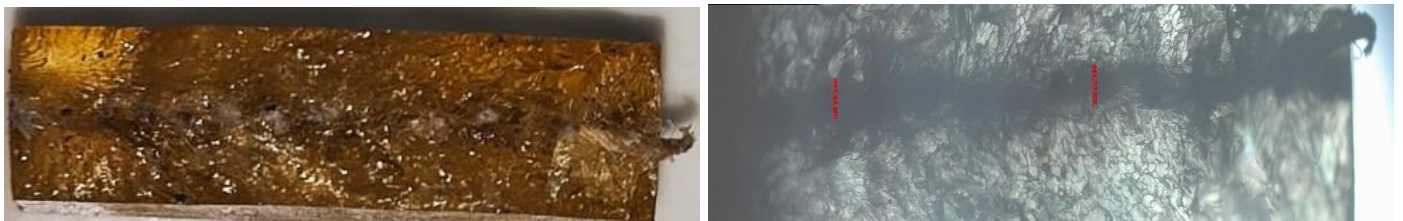
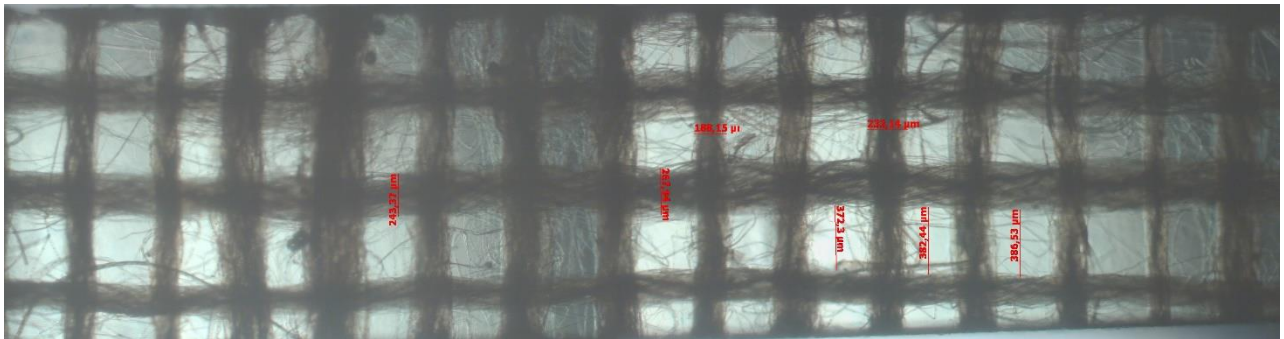


Figura 23

Dimesión del diamtro de fibra y distancia entre ellas.



En los compuestos reforzados con fibra de lino la fractura se dio diferente a los dos casos anteriores, la zona de falla se observa uniforme y con una ruptura a 90° , se presume que debido a una fracción volumetrica de fibra demasiado baja, el compuesto está comportandose muy similar a resina. Se observa que debido al reducido diametro de las fibras transversales, la zona de falla

no coincide con dichas fibras, diferenciándose del fique-biopoxy y lino-biopoxy. Se observan defectos como zonas huecas tanto internamente como en zonas superficiales, disminuyendo su esfuerzo máximo a tracción debido a concentraciones de esfuerzo.

6. Análisis de resultados

En las figuras 21 y 22 se ilustra el módulo elástico y el esfuerzo de tracción obtenidos mediante el ensayo de tracción.

Figura 24

Módulo elástico de todos los materiales.

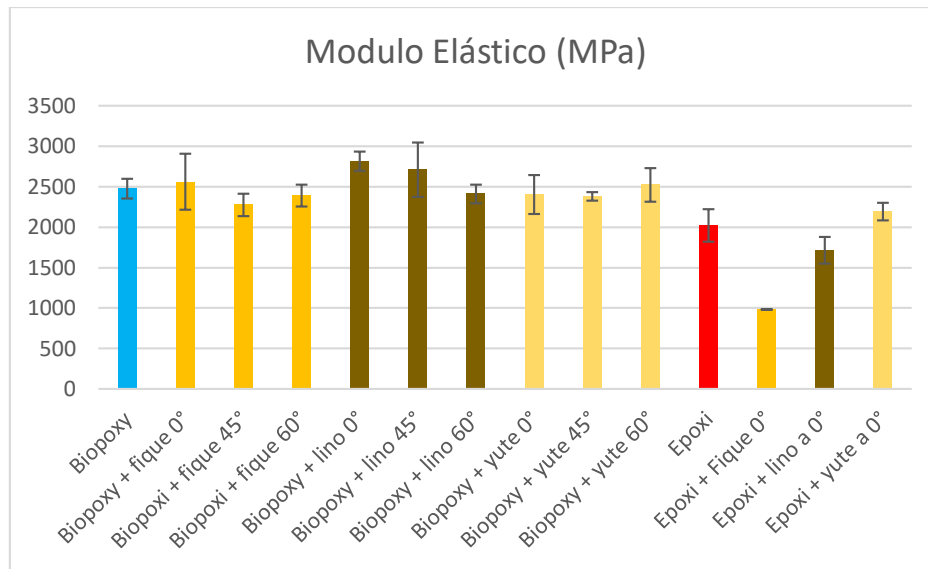
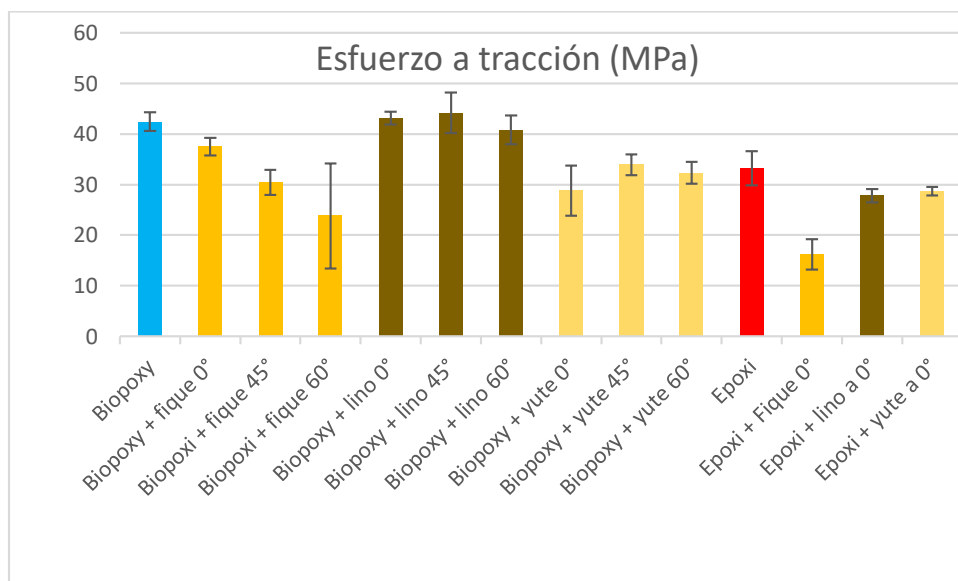


Figura 25

Esfuerzo de tracción de todos los materiales.



Si analizamos el esfuerzo de tracción en los materiales, se evidencia que los compuestos reforzados con fibras de lino obtuvieron mejores propiedades a tracción respecto a las fibras de yute y fique. El Biopoxy reforzado con fibras de lino a 0° mostró la mayor resistencia a la tracción con un promedio de 43.07 MPa y una desviación estándar de 1.27 MPa, al compararlo con Biopoxy se evidencia que el refuerzo aumento la resistencia del material un 3.5%, asimismo logro que el material aumentara su rigidez un 13.8% con módulo elástico de 2815.7 MPa.

Para la resina epoxi se observa que al incorporar el refuerzo de fibra natural, sus propiedades se ven afectadas demostrando así poca compatibilidad fibra matriz. De las tres fibras el yute presenta mejor respuesta a la tracción pues, aunque no le aumenta su resistencia si logra mejorar su rigidez.

A pesar que se aumentó la rigidez de los materiales con matriz Biopoxy es necesario resaltar que el esfuerzo ultimo a la tracción se ve disminuido al tratar el material compuesto, esta reducción de esfuerzo puede deberse a factores como:

- El proceso de manufactura del compuesto no fue el más óptimo.
- La fracción volumétrica de fibra (menor a 6%) es inferior a lo recomendado por otros estudios donde recomiendan una fracción optima cercana al 25%.
- La presencia de defectos superficiales en la resina como cavidades huecas y defectos internos como burbujas generan concentradores de esfuerzos.

7. Homogenización numérica

En un material compuesto reforzado con fibras, las fibras pueden estar dispuestas en diferentes direcciones y ángulos. Dependiendo de su orientación, el material puede mostrar propiedades significativamente diferentes en cada dirección, lo que se conoce como comportamiento anisotrópico. Para modelar adecuadamente estos materiales, es necesario tener en cuenta las propiedades anisotrópicas y cómo se relacionan en diferentes direcciones.

La técnica de homogeneización numérica se utiliza para transformar un material compuesto anisotrópico en un modelo homogéneo equivalente, con propiedades efectivas que son aplicables en todas las direcciones. Esta simplificación permite una modelización y simulación más sencilla y precisa de materiales compuestos reforzados con fibras, como la predicción de la matriz de rigidez del compuesto.

7.1 Modelo del compuesto

La representación geométrica realista de los tejidos es esencial para modelar las propiedades mecánicas y físicas de los tejidos y compuestos textiles, para modelar nuestro tejido se utilizó el software TexGen, desarrollado por Polymer Composites Group en la universidad de Nottingham como procesador de modelado para textiles (Lin et al., 2011). Lo que se pretende con el modelado del compuesto es poder describir la matriz de rigidez del material.

El modelo el compuesto de Biopoxy con fique. Este material se puede describir únicamente con 5 constantes debido a que su comportamiento mecánico se rige bajo el modelo

de material laminado, por lo tanto, se puede analizar como un material transversalmente isotrópico.

La ecuación que describe el comportamiento de un material transversalmente isotrópico puede escribirse como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{23} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{22} - C_{23})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

Ademas de esto se cumple la dependencia del cuarto termino de la diagonal principal tal que:

$$C_{44} = \frac{C_{22} - C_{23}}{2} \quad (7)$$

Por lo tanto, se tiene que:

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} \quad (8)$$

Finalmente, para definir totalmente las propiedades del material se necesitara encontrar los modulos elasticos longitudinal y transversal (E_1 y E_2), los coeficientes de Poisson ν_{12} , ν_{23} ; el módulo cortante G_{12} , a demas se cumple que:

$$E_1 = E_2$$
$$G_{12} = G_{23}$$
$$\vartheta_{12} = \vartheta_{13}$$

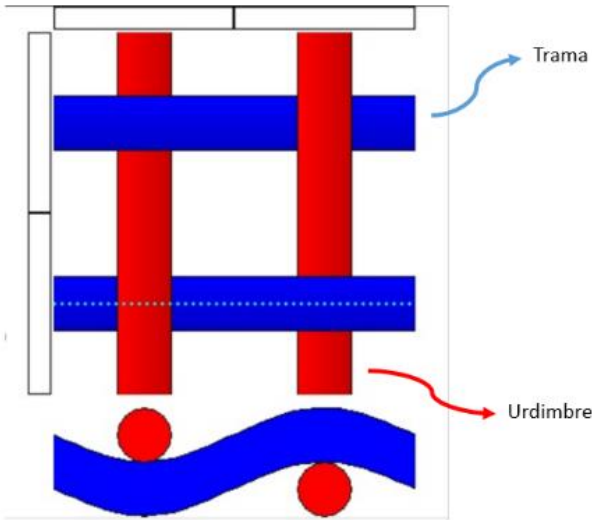
Para la gemotria del textil se genera un elemnto representativo de volumen, de modo que se use la menor capacidad de cómputo para analizar el modelo.

En la tabla 10 se establecen los parámetros de entrada para modelar el tejido.

Tabla 9
parámetros de entrada

Fique - Biopoxy					
Urdimbre	2	Espaciado (mm)	2	Espesor tejido (mm)	1.2
Trama	2	Espesor de hilo(mm)	0.6		

Figura 26
Modelado de tejido .



Ya establecidos los parámetros del tejido se establece el dominio de la matriz para calcular que porcentaje volumen hay en fibra.

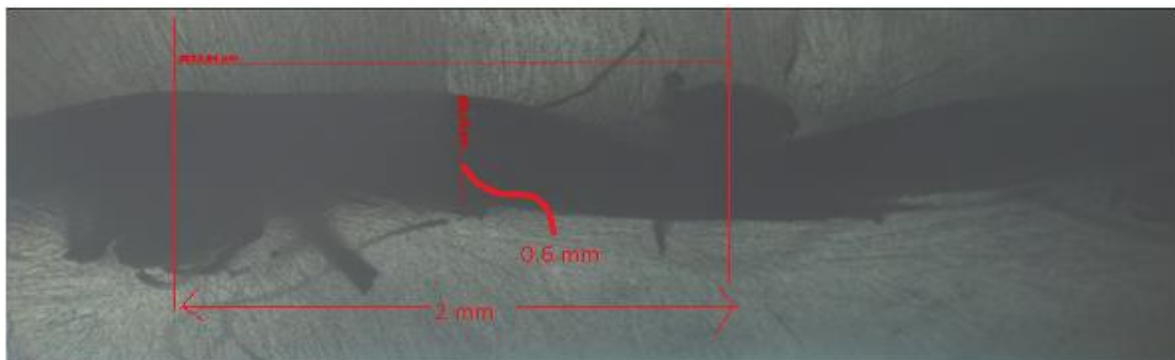
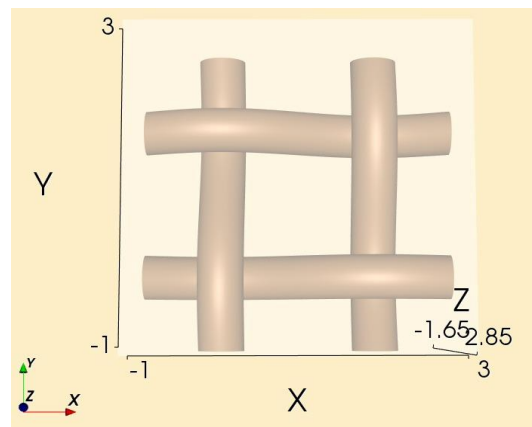
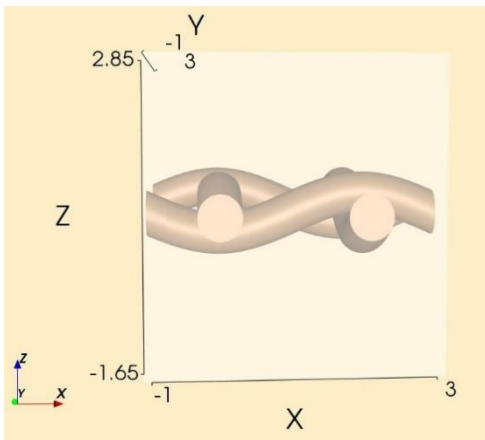
Tabla 10

Dominio de la matriz

Dominio	
Ancho	4.5(mm)
Z	2.85(mm)
(-Z)	1.65(mm)

Figura 27

Modelado del compuesto.



Nota: imagen con diámetro de fibra y longitud entre fibras fue tomada en el laboratorio de microscopía óptica Guatiguara-Uis

Con el material ya modelado el software estima el porcentaje de fibra que hay en el compuesto para este caso se estima un 6.85% ; posteriormente se procede a establecer las propiedades tanto de la fibra como de la matriz.

Tabla 11
Propiedades de fibra y matriz (GPa).

	E1	E2	G12	G23	ν_{12}	ν_{23}
Fibra	8.1	0.4	3.51	3.51	0.375	0.375
Matriz	2.4752	-	-	-	0.35	-

Con las propiedades ya declaradas se realiza una corrida de la simulación y se determina la matriz de rigidez del compuesto. En la tabla 13 se aprecian las constantes ingenieriles resultado de la simulación.

Tabla 12
Constantes ingenieriles.

Constantes Ingenieriles (GPa)	
E1	2.84
E2	2.26
E3	2.26
G12	9.89
G13	9.89
ν_{12}	9.79
ν_{12}	3.5
ν_{12}	3.5
ν_{12}	3.64

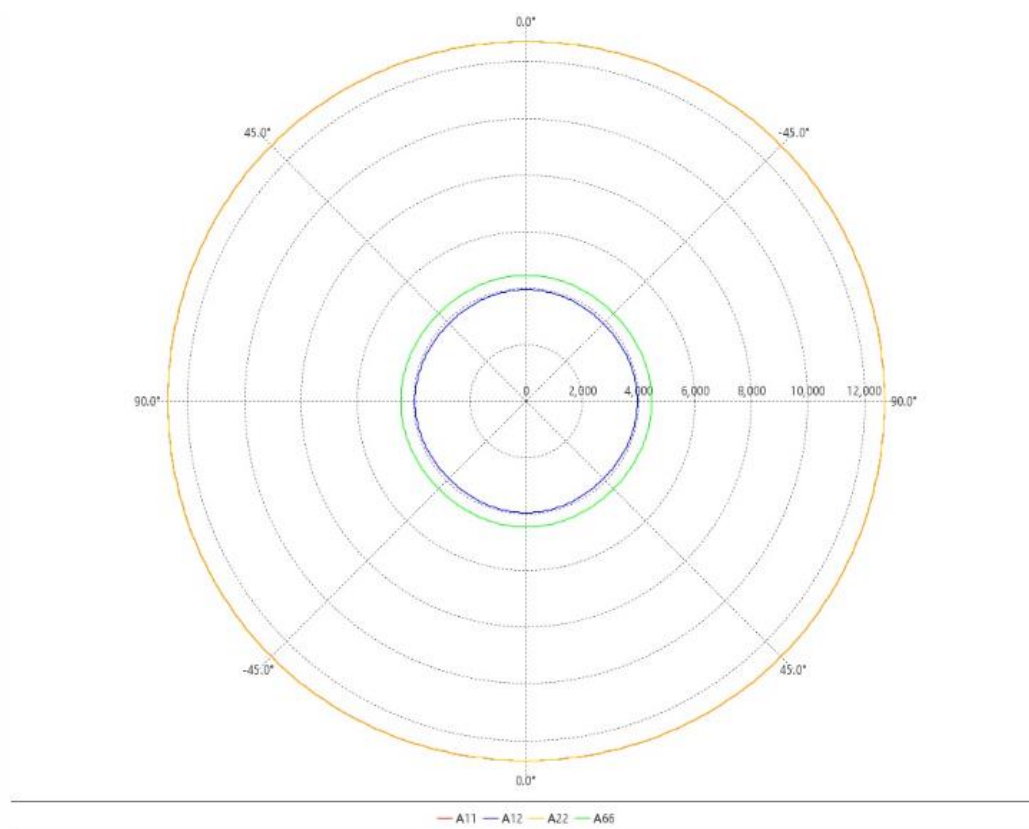
Donde E1 es el módulo de Young estimado por el software en la dirección longitudinal, se calcula el porcentaje de error tomando como valor teórico el modulo obtenido mediante el ensayo de tensión (ver tabla 7).

$$\%ERROR = \left| \frac{2559.3 - 2839.5}{2559.3} \right| * 100 = 10.95\%$$

Con ayuda del programa eLamx se hace la representación del grafico polar de variación de las constantes ingenieriles del laminado para el compuesto biopoxy fique en función del ángulo(θ).

Figura 28

Grafica polar de variación de constantes ingenieriles en función del ángulo



Donde:

A11: Se relaciona con el módulo longitudinal

A22: Se relaciona con el módulo transversal

A12: se relaciona con el Poisson

A66: Se relaciona con el módulo de cortante

Según la curva polar el material tiene un comportamiento Quasi-Isotrópico es decir sus propiedades mecánicas son similares en todas las direcciones, no hay influencia significativa sobre todo por el porcentaje fibra – matriz es decir a medida que se aumente la fracción volumétrica se va a apreciar mucho más el comportamiento anisótropo.

8. Confrontación de propiedades de los compuestos obtenidos con lo encontrados en la bibliografía

Se encontró diversidad de estudios realizados a materiales compuestos biodegradables tanto con refuerzo natural, como con matriz biobase. Para llevar a cabo esta comparación decidimos centrarnos en los biocompuestos reforzados con fibras naturales especialmente fique, lino y yute, resaltando entre todas propiedades como su esfuerzo a tensión y su módulo elástico hay que resaltar que las propiedades de cada compuesto varían por múltiples factores, ya sea la forma en la que estaba incorporada el refuerzo, el proceso de manufactura utilizado, el tipo de matriz, entre otros.

Tabla 15
propiedades mecánicas a tensión de compuestos reforzados con fibras.

Tipo de Fibra	Matriz	Proceso de Manufactura	Esf. Tensión	Módulo Elástico.	Referencia
Fique (tejido)	Biopoxy	Moldeo manual	37.5 MPa	2.6 GPa	Elaboración propia
Yute (tejido)	Biopoxy	Moldeo manual	34 MPa	2.2 GPa	Elaboración propia
Lino (tejido)	Biopoxy	Moldeo manual	43.1 MPa	2.7 GPa	Elaboración propia
Yute (fibra corta)	Epoxi	moldeo por compresión	12.4 MPa	1.06 GPa	(Gopinath et al., 2014)
Fique(fibra larga)	Epoxi	moldeo manual	30.4 MPa	1.66 GPa	(Muñoz et al., 2014)
Lino (fibra tejida)	PLA	moldeo por compresión	42.3 MPa	2.1 GPa	(Javier & Valdez, 2021)
yute (fibra tejida)	PLA	moldeo por compresión	69.3 MPa	4.8 GPa	(Javier & Valdez, 2021)
Yute (fibra larga)	Epoxi	Infusión al vacío	32.9 MPa	0.92 GPa	(Begum, K. & Islam, 2013)
Lino (fibra tejida)	Epoxi	Infusión al vacío	75 MPa	5.2 GPa	(Peças et al., 2018)
Fique (fibra continua)	Epoxi	moldeo por compresión	60.2 MPa	1.86 GPa	(Betts et al., 2017)
Carbono (fibra tejida)	resina fenólica	infusión al vacío	95 MPa	6.1GPa	(Rodríguez, 2012)

En general, se puede observar que las fibras naturales tienen una resistencia a la tensión menor que la fibra de carbono. Sin embargo, presentan una ventaja en términos de su relación resistencia-peso, y son una alternativa más sostenible y económica.

Entre las fibras naturales, se observa que el lino tiene la mayor resistencia a la tensión con 43.1 MPa, seguido por el fique con 37.5 MPa y el yute con 34 MPa. Por otro lado, el yute tejido con PLA tiene una resistencia a la tensión mucho mayor (69.3 MPa) en comparación con las otras fibras naturales tejidas. En cuanto al módulo de elasticidad, se observa que el yute tejido con PLA tiene el valor más alto (4.8 GPa), seguido por el lino tejido con epoxi (5.2 GPa) y la fibra de carbono tejida con resina fenólica (6.1 GPa). En resumen, se puede concluir que la elección del tipo de fibra y el proceso de manufactura dependerá del uso y aplicación final del producto, y que las fibras naturales pueden ser una alternativa viable y sostenible a los materiales sintéticos en ciertas aplicaciones.

9. Conclusiones

- El Biopoxy es una opción viable de matriz para la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras naturales debido a su alta resistencia a la tracción logrando valores de 42.4 MPa y módulo de rigidez de 2475.2 MPa, en comparación con el Epoxi sintético llegando a alcanzar más del 22.4% de aumento de rigidez.
- El refuerzo con fibras de lino proporciona la mejor combinación de resistencia a la tracción y módulo en comparación con las otras fibras naturales estudiadas.
- La presencia de cavidades dentro del material provocadas por el aire atrapado permitió la concentración de esfuerzos reduciendo la resistencia del material.
- El compuesto con más porcentaje de elongación fue Lino a 45° + Biopoxy registrando un 3.25% de elongación.
- Los compuestos con matriz Biopoxy presentan comportamiento quasi-isotrópico es por esto que sus propiedades mecánicas son similares en cualquier dirección, este comportamiento se presenta debido a su poca fracción volumétrica de fibra.
- La resina epoxi sintética no presenta buena compatibilidad con las fibras naturales afectando su resistencia y rigidez.

9. Recomendaciones

- Se sugiere realizar pruebas adicionales, como pruebas de fatiga, para evaluar la resistencia y durabilidad a largo plazo de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales.
- Es importante seguir investigando y explorando nuevas fibras naturales para mejorar aún más las propiedades mecánicas y la sostenibilidad de los materiales compuestos reforzados con fibras naturales.
- Es importante asegurarse de utilizar fibras naturales de alta calidad y uniformidad al fabricar materiales compuestos, para evitar posibles variaciones en las propiedades mecánicas del material.
- Se recomienda optimizar los procesos de fabricación con el objetivo de mejorar tanto la calidad como la uniformidad de los materiales compuestos que están reforzados con fibras naturales.

Bibliografía

- Araújo, J. R., Waldman, W. R., & De Paoli, M. A. (2008). Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: Coupling agent effect. *Polymer Degradation and Stability*, 93(10), 1770–1775. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2008.07.021>
- Ashori, A. (2008). Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries *Bioresource Technology*, 99(11), 4661–4667. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.043>
- Azwa, Z. N., Yousif, B. F., Manalo, A. C., & Karunasena, W. (2013). A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Materials and Design*, 47, 424–442. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.025>
- Delvasto, S., Toro, E. F., Perdomo, F., & de Gutiérrez, R. M. (2010). An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets. *Construction and Building Materials*, 24(2), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.010>
- Elfehri Borchani, K., Carrot, C., & Jaziri, M. (2015). Biocomposites of Alfa fibers dispersed in the Mater-Bi® type bioplastic: Morphology, mechanical and thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78, 371–379. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2015.08.023>
- Gómez-Suarez, S. A., & Córdoba-Tuta, E. (2022). Composite materials reinforced with fique fibers – a review. *Revista UIS Ingenierías*, 21(1), 163–178. <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022013>
- Hidalgo-salazar, M. A., & Correa, J. P. (2018). *Resultados en Física Propiedades mecánicas y térmicas de biocompuestos a partir de mantas industriales no tejidas de fibra de Fique con Resina Epoxi y Polietileno Lineal de Baja Densidad*. 8, 461–467.
- Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., & Trada, M. (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 856–873. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.010>
- Manthey, N. W., Cardona, F., Francucci, G., & Aravinthan, T. (2013). Thermo-mechanical properties of epoxidized hemp oil-based bioresins and biocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(19), 1444–1456. <https://doi.org/10.1177/0731684413493030>

- Mohammed, L., Ansari, M. N. M., Pua, G., Jawaidd, M., & Islam, M. S. (2015). *A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composite and Its Applications*.
<https://doi.org/10.1155/2015/243947>
- Niedermann, P., Szebényi, G., & Toldy, A. (2015). Characterization of high glass transition temperature sugar-based epoxy resin composites with jute and carbon fibre reinforcement. *Composites Science and Technology*, 117, 62–68.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.06.001>
- Rajesh, M., & Pitchaimani, J. (2017). Experimental investigation on buckling and free vibration behavior of woven natural fiber fabric composite under axial compression. *Composite Structures*, 163, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.046>
- Rohit, K., & Dixit, S. (2016). A review - future aspect of natural fiber reinforced composite. *Polymers from Renewable Resources*, 7(2), 43–60.
<https://doi.org/10.1177/204124791600700202>
- Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaidd, M., & Jayakrishna, K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 133, 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.008>
- Sandra Milena Velásquez Restrepo, Gabriel Jaime Pelaéz Arroyave, D. H. G. V. (2016). *Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica : una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos Use of vegetable fibers in polymer matrix composites : a review*. 77–86.
- Stanzione, J. F., Giangiulio, P. A., Sadler, J. M., La Scala, J. J., & Wool, R. P. (2013). Lignin-based bio-oil mimic as biobased resin for composite applications. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 1(4), 419–426. <https://doi.org/10.1021/sc3001492>
- Suleiman Khayal, O. E. (2017). Literature review on imperfection of composite laminated plates. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 5(3), 119.
<https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.01.001>
- Venkateshwaran, N., ElayaPerumal, A., Alavudeen, A., & Thiruchitrambalam, M. (2011). Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites. *Materials and Design*, 32(7), 4017–4021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.002>