

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UNA MATRIZ POLIMÉRICA
NATURAL REFORZADA CON FIBRA DE BIJAO (*CALATHEA LUTEA*)

CAMILO ANDRÉS ROMERO INFANTE

EDGAR DANIEL PARADA ANDRADE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCIMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2020

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UNA MATRIZ POLIMÉRICA
NATURAL REFORZADA CON FIBRA DE BIJAO (*CALATHEA LUTEA*)

CAMILO ANDRÉS ROMERO INFANTE

EDGAR DANIEL PARADA ANDRADE

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico

Director:

Alberto David Pertuz Comas

Phd. Ingeniería Mecánica

Codirector

German A, Díaz Ramírez

Ms. Ingeniería de Materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2020

DEDICATORIA

Agradezco infinitamente a Dios, por guiarme siempre, por fortalecer mi corazón, por permitirme cumplir tan anhelado sueño, por llenarme de valor frente a las adversidades presentadas en mi camino. A todas aquellas personas que han sido mi soporte durante todo el periodo de estudio y devolverme la fe en aquellos momentos donde creía que no era posible terminar.

A mi madre Myriam Rosa, gracias por su amor incondicional y fe en mí, por enseñarme que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se puede lograr y todo obstáculo se puede superar, por su infinita paciencia y quienes por su esfuerzo y apoyo incondicional me impulsaron a cumplir mis metas en la formación profesional.

A mi hermano Carlos y hermana Johanna que tanto quiero, gracias por estar ahí, por sus voces de aliento y de una u otra forma hacer esto posible.

Edgar Daniel Parada Andrade

DEDICATORIA

A mi madre Leonor Infante y mi padre Juan Romero que con su esfuerzo sacrificio y dedicación lograron darme el valor y las herramientas necesarias para poder culminar esta etapa de mi vida. A ustedes mis viejos les dedico este logro

Camilo Andrés Romero Infante

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Alberto Pertuz y German Diaz, por creer en este proyecto de investigación y dirigirnos aportando consejos y orientación para llevarlo a cabo.

Al laboratorio del Parque Tecnológico Guatiguará, por darnos acceso a la instalación del laboratorio de microscopia y colaborarnos en el desarrollo de las diferentes pruebas realizadas, agradecemos el buen trato de su personal y el servicio prestado.

A la universidad Industrial de Santander por brindarnos una excelente formación académica, a nuestros profesores que son un pilar para el aprendizaje en nuestra vida profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. MARCO REFERENCIAL.....	19
2.1. MARCO TEÓRICO	19
2.1.1. Bijao (calathea lutea):	19
2.1.2. Matriz natural (Cera de abeja):	20
2.1.3. Tratamiento de hidróxido de sodio (NaOH):.....	21
2.1.4. Norma ASTM D 882-12:.....	22
2.1.5. Norma ASTM D 3039-17:.....	22
2.1.6. Norma ASTM D 7264-15:.....	23
2.1.7. Fractografía:.....	23
2.2. ESTADO DEL ARTE.....	23
3. MÉTODOLOGIA.	27
3.1. MATERIALES.	27
3.1.1. Fibra (“Bijao” calathea lutea):.....	27
3.1.2. Matriz natural (Cera de abeja):	27
3.1.3. Hidróxido de sodio (NaOH):.....	27
3.2 OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES.....	28

3.2.1 Fibra (Bijao Calathea lutea):	28
3.2.2 Matriz natural (Cera de abeja):	29
3.2.3. Material Compuesto (Fibra con cera de abeja):	31
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.....	32
3.3.1. Ensayo de tensión para fibra:	32
3.3.2. Ensayo de tensión para cera de abeja y material compuesto:	33
3.3.3. Ensayo de flexión para cera de abeja y material compuesto:	33
3.3.4. Análisis de fractografía:.....	33
4. RESULTADOS.....	37
4.1. CARACTERIZACIÓN SEGÚN NORMA ASTM 882-12.....	37
4.1.1. Caracterización a tensión fibra de bijao:	37
4.1.2. Caracterización a tensión fibra de bijao con tratamiento de NaOH:.....	40
4.2. CARACTERIZACIÓN SEGÚN NORMA ASTM 3039-17.....	43
4.2.1. Caracterización a tensión cera de abeja:	43
4.2.2. Caracterización a tensión material compuesto polimérico:	46
4.3. CARACTERIZACIÓN SEGÚN NORMA ASTM 7264-15.....	49
4.3.1. Caracterización a flexión de cera de abeja:	49
4.3.2. Caracterización a flexión material compuesto polimérico:	52
4.4. FRACTOGRAFIA.....	55
4.5. DISEÑO DEL EXPERIMENTO	57
4.5.1. Diseño del experimento a tensión.....	57
4.5.2. Diseño de experimento a Flexión.....	57
5. ANALISIS DE RESULTADOS.....	58

5.1. NORMA ASTM 882-12.....	58
5.2. NORMA ASTM 3039-17.....	59
5.3. NORMA ASTM 7264-15.....	60
5.4. RELACIÓN ENTRE LA FRACTURA Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS: MÉTODO DE LA FRACTOGRAFIA.....	62
5.4.1. Fractografía según la Norma ASTM 3039-17:.....	62
5.4.2. Fractografía según la Norma ASTM 7264-15:.....	62
5.5. ANÁLISIS DISEÑO EXPERIMENTO.	63
5.5.1. Análisis diseño experimento para tensión:.....	63
5.5.2. Análisis diseño experimento para Flexión:.....	64
CONCLUSIONES.	66
7. RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de experimento.	35
Tabla 2. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 882-12, para la fibra orientada a 0°.	40
Tabla 3. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 882-12, para la fibra orientada a 0° bajo tratamiento de NaOH.	43
Tabla 4. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 3039-17, para la probeta de cera de abeja.	46
Tabla 5. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 3039-17 para el material compuesto con fibra orientada a 0°.	49
Tabla 6. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 7264-15, para la muestra de cera de abeja.	52
Tabla 7. Resultados de las propiedades mecánicas con base al ensayo de flexión de la cera de abeja más la fibra a 90°.	55
Tabla 8. Resultados Esfuerzo de Tensión	57
Tabla 9. Resultados Esfuerzo de Flexión	57
Tabla 10. Análisis ANOVA para tensión	63
Tabla 11. Análisis Duncan para Tensión	63
Tabla 12. Análisis ANOVA para Flexión	64
Tabla 13. Análisis Duncan para Flexión.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema diseño de experimento.	34
Figura 2. Esfuerzo de tensión para la fibra orientada a 0°, 45° y 90°.	38
Figura 3. Grafica esfuerzo-deformación a tensión de la fibra orientada a 0°.	39
Figura 4. Esfuerzo de tensión para la fibra orientada a 0°, 45° y 90°, bajo tratamiento de NaOH.	41
Figura 5. Grafica esfuerzo-deformación a tensión de la fibra orientada a 0° con tratamiento de NaOH.	42
Figura 6. Esfuerzo de tensión para la cera de abeja.	44
Figura 7. Grafica esfuerzo-deformación a tensión de la cera de abeja.	45
Figura 8. Esfuerzo de tensión para cada compuesto con fibra orientada a 0°, 45° y 90°.	47
Figura 9. Grafica esfuerzo-deformación a tensión del compuesto con fibra orientada a 0°.	48
Figura 10. Esfuerzo de flexión para la cera de abeja.	50
Figura 11. Grafica esfuerzo-deformación a flexión de cera de abeja.	51
Figura 12. Resultados esfuerzo máximo a flexión compuesto polimérico.	53
Figura 13. Grafica esfuerzo-deformación a flexión del material compuesto con fibra orientada a 90°.	54
Figura 14. Resultado de esfuerzo de tensión de principales fibras.	60
Figura 15. Resultado de esfuerzo de flexión de principales fibras.	61

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Purificación hoja de bijao con NaOH.	29
Fotografía 2. Purificación cera de abeja.	30
Fotografía 3. Molde con papel parafinado.	30
Fotografía 4. Proceso de obtención de placa.	32
Fotografía 5. Maquina universal de ensayos MTS.....	32
Fotografía 6. Microscopio electrónico de barrido.....	34
Fotografía 7. Orientación de fibras de Bijao.	36
Fotografía 8. Fractografía de la probeta de cera de abeja y fibra orientada a 0°.	55
Fotografía 9. Fractografía de la probeta cera de abeja y fibra orientada a 90°.	56

GLOSARIO

COEFICIENTE DE POISSON: Es la relación entre la deformación unitaria longitudinal y la deformación unitaria lateral.

DUCTILIDAD: Es una medida de la cantidad de deformación plástica que puede darse en un material antes que este se rompa.

DEFORMACIÓN UNITARIA: Es la relación entre alargamiento y longitud inicial.

ELONGACIÓN: Nombre del alargamiento de un material que es sometido a un esfuerzo de tracción.

ESFUERZO DE RUPTURA: Valor en el cual se genera la fractura de la probeta y, por tanto, el fin del ensayo.

FRACTOGRAFIA: Es el método por el cual se realiza el análisis de las características de la fractura en un material.

MÓDULO DE ELASTICIDAD: Es un parámetro ampliamente usado en ingeniería que relaciona la rigidez de un material cuando es sometido a cargas de tensión.

PLASTICIDAD: Es la propiedad en la que el material no regresa a sus dimensiones originales al suprimir la carga que ocasiona la deformación.

SEM: Microscopía electrónica de barrido, utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen.

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE UNA MATRIZ POLIMERICA REFORZADA CON FIBRA DE BIJAO (*CALATHEA LUTEA*) *

AUTOR: ROMERO INFANTE, Camilo Andrés
PARADA ANDRADE, Edgar Daniel **

PALABRAS CLAVE: material compuesto, matriz polimérica, calathea lutea.

Se desarrolló un material compuesto con fibra natural “bijao” (*Calathea Lutea*) perteneciente a la familia de las Marantaceae¹ y como matriz se utilizó la cera de abeja. Se evaluó el desempeño mecánico del compuesto polimérico, así como de sus componentes por separado. En el diseño experimental se varió la condición inicial de las fibras de refuerzo mediante un tratamiento de alcalinización con hidróxido de sodio (NaOH) para eliminar las impurezas, a la cera de abeja se le aplicó un proceso de decantación para purificarla.

El material compuesto se obtuvo mediante vertido, utilizando la fibra natural en las orientaciones de 0°, 45° y 90°; de esta manera, se establecieron las probetas de tracción y flexión, luego se seleccionó la mejor orientación mediante los resultados obtenidos en las pruebas respectivas. Finalmente, se analizó los modos de fractura mediante Fractografía obtenidas por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

El compuesto polimérico ensayado por tensión con fibra orientada a 0°, mostró 1.681 (MPa) de esfuerzo de tensión máximo (σ_{max}), mostrando un resultado mejor que los componentes separados y mejor que el poliestireno expandido que tiene un esfuerzo a tensión de ≥ 150 (KPa). El compuesto ensayado en condición de flexión con fibra orientada a 90° tuvo un esfuerzo máximo de flexión de 2.20 (MPa), un resultado de similar valor al de la cera de abeja, pero mejorando propiedades como el módulo de elasticidad; comparado con el poliestireno expandido que soporta ≥ 150 (KPa) para flexión. Se realizó un análisis fractográfico mediante el cual se mostró, que el material a tensión tuvo falla de desgarre por estiramiento, y a flexión se ocasionó la falla de desgarre por estiramiento y aplastamiento.

¹ Elaine Santiago Brilhante de Albuquerque, João Marcelo Alvarenga Braga, and Ricardo Cardoso Vieira, 'Morphological Characterisation of Silica Phytoliths in Neotropical Marantaceae Leaves', *Plant Systematics and Evolution*, 299.9 (2013), 1659–70 <<https://doi.org/10.1007/s00606-013-0823-9>>.

* Trabajo de grado.

**Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director Alberto David Pertuz Comas.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF A BIJAO FIBER REINFORCED POLYMER MATRIX (CALATHEA LUTEA) *

AUTHORS: ROMERO INFANTE, Camilo Andrés
PARADA ANDRADE, Edgar Daniel **

KEYWORDS: composite material, polymer matrix, calathea lutea.

A composite material with natural “bijao” fiber (*Calathea Lutea*) belonging to the Marantaceae{Formatting Citation}² family was developed and the natural beeswax resin was used as the matrix. The mechanical performance of the polymeric compound as well as its components were evaluated separately. In the experimental design, the initial condition of the reinforcing fibers was varied by means of an alkalization treatment with sodium hydroxide (NaOH) to remove impurities, a decanting process was applied to the beeswax to purify it.

The composite material was obtained by pouring, using natural fiber in 0°, 45° and 90° orientations; in this way, tensile and flexural specimens were established, then the best orientation was selected through the results obtained in the respective tests. Finally, the fracture modes were analyzed by fractography obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM).

The polymeric compound tested for stress with fiber oriented at 0 °, showed 1,68 (MPa) of maximum tensile stress (σ_{max}), showing, a better result than the separated components and better than the expanded polystyrene that has a tensile stress of ≥ 150 (KPa). The compound tested under flexing condition with fiber oriented at 90 ° had a maximum flexural stress of 2.20 (MPa), a result of similar value to that of the resin, but improving properties such as the modulus of elasticity; compared to expanded polystyrene that supports ≥ 150 (KPa) for flexing. A fractographic analysis was carried out by which it was shown that the material subjected to tension had a stretch tear failure, and flexion caused the failure of tear by stretching and crushing.

*Bachelor tesis

**Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director. Alberto David Pertuz Comas.

INTRODUCCIÓN

La expansión de las aplicaciones en el área de los materiales compuestos ha impulsado la investigación en busca de nuevos desarrollos tanto de cera de abejas naturales como de fibras del mismo tipo; Esto justifica la intención de explorar materiales alternativos que cumplan las solicitudes mecánicas además de ser amigables con el medio ambiente³. Este hecho lo afirma el desarrollo sostenible que se ha venido implementando en Colombia a consecuencia de la rápida globalización del mercado, que ha ocasionado nuevas formas de trabajar la materia prima con la que se elaboran muchos de los productos que conocemos; y aunque estos estén fabricados con materiales innovadores y tecnológicos, las fibras naturales se están instaurando a lo largo del desarrollo de la civilización como parte importante.⁴

La investigación basa principalmente su fundamento en que el uso de fibras naturales en Colombia ha estado orientado de manera artesanal tanto a la producción de objetos autóctonos, como a su utilización en la gastronomía; A través de nuestra historia como región, hemos observado la utilización de las fibras naturales en la creación de utensilios de uso cotidiano, que con el tiempo y su desuso se convirtieron en llamadas artesanías, pero donde se resalta el buen comportamiento mecánico que poseen⁵; Por otro lado, la utilización de la fibra de bijao como envoltura de alimentos, ha tenido un desarrollo interesante en su uso,

³ P Abad and others, *Ciencia y Tecnología de Materiales y Minerales*, 2013, p. 138.

⁴ CONACYT, 'Tecnologías Y Medio Ambiente', 2009, 75.

⁵ E.L Linares and others, *Fibras Vegetales Utilizadas En Artesanías En Colombia*, 2008.

puesto que ha proporcionado rigidez en el almacenamiento de alimentos⁶. Sin embargo, el otro material importante en la investigación es la cera de abeja natural, la cual surge luego de analizar el entorno y la búsqueda que se hizo en un momento del proceso, donde no se tenían ceras de abeja de este tipo, pero sí se tenía la necesidad de sus propiedades; la cera de abeja ha sido utilizada como material conformante y aunque tiene falencias estructurales, presenta comportamientos mecánicos que podrían aportar un buen desempeño en un compuesto⁷.

Finalmente, la investigación propone el uso de la fibra natural “bijao” (*Calathea Lutea*) perteneciente a la familia de las marantáceas⁸ y como matriz propone la cera de abeja⁹, para conformar un compuesto totalmente natural. Para evaluar el desempeño mecánico del compuesto polimérico, así como de sus componentes por separado; inicialmente varía la condición originaria de las fibras mediante un tratamiento de alcalinización con NaOH. Posteriormente, los ensayos de tracción se llevan a cabo bajo las normas ASTM D 882-12¹⁰ y ASTM D 3039-17¹¹ para evaluar el desempeño de las fibras, la cera de abeja y los compuestos; también, evalúa el comportamiento a flexión bajo la norma ASTM D 7264-15¹², todo esto orientando

⁶ Santiago Díaz, ‘Las Hojas de Las Plantas Como Envolturas de Alimentos’, 2011, 120.

⁷ Stefan Bogdanov and Bee Product Science, ‘Beeswax: Production, Properties, Composition, Control’, April, 2016.

⁸ de Albuquerque, Braga, and Vieira.

⁹ Stefan Bogdanov, ‘Beeswax : History , Uses and Trade’, April, 2016.

¹⁰ ASTM International, ‘ASTM D882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting’, *ASTM Standards*, 2012, 12 <<https://doi.org/10.1520/D0882-12.2>>.

¹¹ ASTM International, ‘ASTM D 3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials’, *Annual Book of ASTM Standards*, 15.03 (2000), 1–13 <https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-08>.

¹² ASTM, ‘D 7264 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials’, *Astm D7264 / D7264M*, i (2015), 1–11 <<https://doi.org/10.1520/D7264>>.

la fibra a 0°, 45° y 90°. Finalmente, realiza un análisis de los modos de fractura llevado a cabo mediante fractografía obtenida por microscopía electrónica de barrido (SEM)¹³.

¹³ B R Kulander and Stuart L Dean, 'Observations on Fractography with Laboratory Experiments for Geologists', *Geological Society, London, Special Publications*, 92.1 (1995), 59–82 <<https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1995.092.01.05>>.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar mecánicamente un compuesto polimérico a base de resina natural y reforzado con fibras de “bijao” (calathea lútea) mediante ensayos de tracción y flexión aplicando normas ASTM.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar el comportamiento mecánico de las hojas de “bijao” (calathea lútea) de acuerdo con la orientación de las fibras bajo la norma ASTM D 882 – 12.

Evaluar la influencia del tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH) sobre el comportamiento mecánico de las hojas de “bijao” (calathea lútea) bajo la norma ASTM D 882 – 12.

Obtener y caracterizar la resina natural mediante ensayos de: Tracción bajo la norma ASTM D 3039/D 3039M – 17 y flexión bajo la norma ASTM D 7264/D 7264M – 15.

Obtener y caracterizar el compuesto polimérico a base resina natural y reforzada con fibras de “bijao” (calathea lútea), mediante ensayos de: Tracción bajo la norma ASTM D 3039/D 3039M – 17 y flexión bajo la norma ASTM D 7264/D 7264M – 15.

Analizar la relación entre la fractura y las propiedades mecánicas estudiadas utilizando el método de la fractografía.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Bijao (*calathea lutea*): Su nombre más común es bijao o bihao es de la clase liliopsida del orden Zingiberales de la familia Marataceae con genero Calathea de la especie lútea. Es una planta que alcanza los 3 metros de altura, posee múltiples tallos que nacen desde su base, y pueden articularse para formar nuevos tallos y así aumentar en altura el tamaño de la planta. Las hojas miden entre los 50 cm y los 100 cm de largo y entre 25 cm y los 60 cm de ancho, su envés es de color blanco y posee cera, su peciolo es más largo que la hoja, su nerviación es poco marcada, fina, junta y paralela, su borde es entero, su ápice tiene forma redonda y termina en una pequeña punta y su base es redondeada. Se encuentra en las zonas cálidas y cafeteras de las cordilleras, se observa en sectores húmedos de la geografía colombiana, junto a solares y quebradas, entre otros lugares. Su habitad esta entre los 0 y los 1600 msnm, en el bosque seco tropical también en el bosque húmedo premontano, ver Imagen 1.14

¹⁴Cortolima, 'Flora', Car 2004, 2004
<https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/APENDICES/K_apendices2101biodiversidad/211111apendice_flora/apendice_2.18_flora.pdf>.

Imagen 1. Planta de bijao



2.1.2. Matriz natural (Cera de abeja): Hasta el siglo XIX, las sustancias resinosas empleadas para la realización de obras de arte o para la composición de materiales adecuados para la restauración eran de origen exclusivamente natural. Las resinas naturales son polímeros que algunos tipos de plantas (principalmente coníferas y varias plantas tropicales) segregan en su corteza, se practican unas incisiones más o menos profundas. Se conocen desde la Antigüedad y encontraron una amplia utilización gracias a sus propiedades filmógenas, adhesivas y repelentes al agua. De hecho, aparecen en numerosas recetas antiguas para la realización de compuestos protectores, transparentes o aislantes y para la preparación de estucos, mezclas adhesivas y sustancias consolidantes.¹⁵

La palabra cera describe una gran variedad de sustancias de origen vegetal y animal, así como productos hechos por el hombre, que en su mayoría son derivados del petróleo. Sin embargo, las ceras naturales no son sustancias individuales; en vez de esto, es una mezcla de varios ácidos grasos de cadena larga y una variedad

¹⁵ Ken B. Anderson, R. E. Winans, and R. E. Botto, 'The Nature and Fate of Natural Resins in the Geosphere-II. Identification, Classification and Nomenclature of Resinites', *Organic Geochemistry*, 18.6 (1992), 829–41 <[https://doi.org/10.1016/0146-6380\(92\)90051-X](https://doi.org/10.1016/0146-6380(92)90051-X)>.

de otros componentes, dependiendo de su origen. Por lo tanto, cada cera tiene características físicas y químicas únicas que son explotadas en múltiples aplicaciones. En particular, la cera de la abeja tiene un espectro muy amplio de usos y ocupa una posición muy especial entre las ceras. ver Imagen 2.¹⁶

Imagen 2. Fusor solar para cera.



2.1.3. Tratamiento de hidróxido de sodio (NaOH): El hidróxido de sodio (NaOH) es un sólido blando e industrialmente se utiliza como disolución al 50 % por su facilidad de manejo. Es soluble en agua, desprendiéndose calor. Absorbe humedad y dióxido de carbono del aire y es corrosivo de metales y tejidos. Es usado, en síntesis, en el tratamiento de celulosa para hacer rayón y celofán, en la elaboración de plásticos, jabones y otros productos de limpieza, entre otros usos. Se obtiene, principalmente por electrolisis de cloruro de sodio, por reacción de hidróxido de

¹⁶ Regionales Y Desarrollo Local, 'Guía de Buenas Prácticas de Producción de Cera de Abejas', 2016.

calcio y carbono de sodio y al tratar sodio metálico con vapor de agua a bajas temperaturas.¹⁷

2.1.4. Norma ASTM D 882-12: Este método de prueba cubre la determinación de la tensión de las propiedades de tracción de los plásticos en forma de láminas finas, incluida la película en menos de 1 mm o 0.04 in de espesor. Este método de prueba se puede usar para probar todos los plásticos dentro del rango de grosor descrito y la capacidad de la máquina empleada. Cabe aclarar que la hoja de bijao (calathea lútea) se tomara como un plástico para poder observar sus propiedades mecánicas.⁸

2.1.5. Norma ASTM D 3039-17: Este método de prueba determina las propiedades de tracción en el plano de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados por fibras de alto módulo. Las formas del material compuesto están limitadas a fibra continua o compuestos discontinuos reforzados con fibras en los que el laminado está equilibrado y es simétrico con respecto a la dirección de prueba. Sin embargo, para hacer ejecutable el objetivo general la orientación de las fibras va a ser continuo y discontinuo paralelo y perpendicular todo esto con respecto a la dirección de la prueba.⁹

¹⁷ U.P.B., 'NaOH Hidróxido de Sodio', *Hoja de Seguridad Hidróxido de Sodio (NaOH)*, 1998, 4.

2.1.6. Norma ASTM D 7264-15: Este método de prueba determina la rigidez a la flexión y las propiedades de resistencia de los compuestos de matriz polimérica. Procedimiento A-A sistema de carga de tres puntos que utiliza carga central en una viga simplemente apoyada. De acuerdo con la norma un procedimiento A: la barra descansa sobre dos soportes y se carga por medio de una nariz de carga a mitad de camino entre los soportes.

2.1.7. Fractografía: Fractografía es el término acuñado por Carl A. Zapffe en 1944 “después de su descubrimiento de un medio para superar la dificultad de acercar la lente de un microscopio a la superficie dentada de una fractura para revelar sus detalles dentro de los granos individuales. El objetivo de la fractografía es analizar las características de la fractura e intentar relacionar la topografía de la superficie de la fractura con las causas y mecanismos básicos de la fractura.”¹⁸

2.2. ESTADO DEL ARTE

Para el modelo de construcción se ha tenido en cuenta un modelo de preparación de placas utilizado en los últimos años para probar este tipo de normas ASTM 3039-17 y 7264-15 mediante ensayos de tracción y flexión, respectivamente, en materiales compuestos conocido como técnica de moldeo manual por vertido.

¹⁸ Kulander y Dean., Observations on fractography with laboratory experiments for geologists, 2005, pp. 59-82.

Como lo menciona Maleque, “se empieza por preparar la fibra a utilizar mediante el método de aplicación manual, que consiste como lo describe en su investigación en la obtención y extracción mediante observación de la zona que mejor presente capacidad de ser analizada. Se prosigue, con el lavado que tiene como objetivo el quitar partículas o impurezas grandes adquiridas en su medio natural de crecimiento de la fibra o en su transporte hasta el laboratorio y el corte de las fibras. Los autores mencionan que para eliminar humedad de la fibra dejan secar al sol las fibras por al menos 12 horas, para que con esto se garantice dicho objetivo. Para finalmente realizar la configuración de tejido que se usa para caracterizar la fibra de la hoja de plátano de acuerdo con el modelo establecido por los investigadores.”¹⁹

Según Baharin, “el proceso de producción de estos tableros como se les denomina inicia con la obtención de la fibra, con su limpieza y con su corte para que vayan tomando la forma deseada que en este caso es del tamaño A4 estándar; sin embargo, en este caso se usa glicerina y agua destilada durante 24 horas y se deja secar a ambiente para posteriormente presionar a 100 kg/cm² a 70 °C hasta eliminar la humedad. los investigadores continuaron con la adecuación de la fibra mediante la técnica de cintas doble cara en base de acrílico y rodillo de goma para exprimir el aire atrapado entre la fibra y el acrílico, más una presión de 100 kg/cm² durante 5 segundos. Luego de esto se lleva a un horno de convección durante 24 horas a 100°C, y se lleva a un equipo para moler a alta velocidad para crear una

¹⁹ M A Maleque, B F Yousif, y S M Sapuan., *Mechanical properties study of pseudo-stem banana fiber reinforced epoxy composite*, 2007, p. 7.

malla de 150 μm para luego verter en un molde de 21 cm por 21 cm por 0.5 cm y presionar a 100 kg/cm² durante 5 minutos; existe una técnica llamada golpeteo para que el vapor contenido dentro del molde se escape y se hace 3 veces. Finalmente, se obtiene una placa lista para el corte de acuerdo con la norma de tracción que se quiera estudiar.”²⁰

Los investigadores Mohmmed, “utilizan la misma técnica mencionada antes con algunas variaciones; estos investigadores comienzan por fabricar el molde compuesto por aluminio y un agente de desunión aplicado al interior; las dimensiones del molde son de 250 mm por 250 mm por 10 mm. Se procede a sumergir la fibra aleatoriamente en la cera de abeja, se vierte y luego se presiona usando un rodillo de goma a temperatura ambiente hasta que la matriz se ajuste apropiadamente, para terminar con un curado de 6 horas y corte de acuerdo con las normas ASTM 882-12, ASTM 3039-17 y ASTM 7264-15 que se estudiaron.”²¹

Por último, Ranganathan y su equipo de investigación “utilizan el mismo método manual para la investigación de las propiedades mecánicas de la fibra de banana y se comienza por obtener las fibras, lavarlas y secarlas con la luz solar y el medio circundante durante 5 horas. Se fabrica un molde de 300 mm por 300 mm por 10 mm y se vierte sobre este la combinación de resina epoxi y la fibra para dejar en

²⁰ A. Baharin et al., *Production of Laminated Natural Fibre Board from Banana Tree Wastes*, *Procedia Chemistry* (Elsevier Ltd., 2016), xix, pp. 999–1006.

²¹ Ramadan Mohmmed and others, ‘Mechanical Properties of Banana Fiber Reinforced Polymer Composites’, May 2018, 2017.

curado durante 24 horas con la ayuda de una prensa de pesas. Finalmente se extrae para su corte según la norma ASTM.”²²

²² S Ranganathan, ‘Fabrication and Mechanical Property Study on Glass / Sisal / Banana Natural Fibres’, January, 2018.

3. MÉTODOLOGIA.

3.1. MATERIALES.

3.1.1. Fibra (“Bijao” *calathea lutea*): Se comenzó por la obtención de la fibra de bijao (*calathea lutea*), ya que el acceso a esta es fácil por varias razones: la localización según investigación la ubicaba cerca de la región y porque socialmente es usada para envolturas de alimentos tradicionales, lo que convierte a esta fibra en un producto comercializado que se encuentra desde las plazas de mercado hasta algunos supermercados de cadena.

3.1.2. Matriz natural (Cera de abeja): Previamente se experimentó con tres tipos de matriz natural tanto vegetal como animal: inicialmente fue la colofonia, luego la cola de animal y por último la cera de abeja, que se seleccionó según lo apreciado en su obtención y elaboración. Este material lo conforman ésteres, hidrocarburos de cadena larga y cetonas, que forman materiales con altos puntos de fusión y gran resistencia al agua. De acuerdo con la investigación, la cera de abeja se encuentra en todo el territorio nacional, y en la región de los Santanderes su comercialización es abundante; sin embargo, se obtuvo de una granja dedicada a la apicultura en el municipio de Ráquira Boyacá.

3.1.3. Hidróxido de sodio (NaOH): Este material es de uso industrial, producido por electrólisis de soluciones acuosas de cloruro de sodio o por la reacción de carbonato de sodio con hidróxido de calcio. se disuelve con gran facilidad en el agua generando una gran cantidad de calor y disociándose por completo en sus

iones. Se puede encontrar con gran facilidad en lugares dedicados a la comercialización de productos químicos. Se ubicó en el centro de la ciudad.²³3.2.

3.2 OBTENCIÓN DE LOS MATERIALES.

3.2.1 Fibra (Bijao *Calathea lutea*): Para la obtención de la fibra de bijao (*calathea lutea*) se estandarizo el siguiente proceso: en primer lugar, se limpió la fibra con agua destilada para remover minerales tanto sólidos como líquidos de la superficie adquiridos durante su desarrollo o durante el transporte hasta el laboratorio; Posteriormente se toma una muestra (considerando la caracterización de la fibra y del compuesto) de las hojas de bijao para aplicarles tratamiento de NaOH, (ver fotografía 1), donde de acuerdo con la investigación del estado del arte se aplica el tratamiento en una proporción de 30 g de NaOH por cada 1000 g de agua destilada durante 5 horas, esto se debe a que durante el proceso de purificación se aplicó el tratamiento con 2 g, 10 g, 20 g de NaOH por cada 1000 g de agua destilada durante 30 minutos, 60 minutos y 180 minutos respectivamente; Luego, para reducir humedad adherida en los pasos anteriores se ubica cada una de las porciones de la muestra total en un flujo de calor por transferencia directa a 50°C y separado por aluminio, (10 minutos); Por último, se realizan los cortes de acuerdo a las dimensiones establecidas por las normas ASTM 882, ASTM 3039 y ASTM 7264.

²³ INSHT, 'Hidróxido De Sodio', *Fichas Internacionales de Seguridad Química*, 2010, 2 <<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/301a400/nspn0360.pdf>>.

Fotografía 1. Purificación hoja de bijao con NaOH.



3.2.2 Matriz natural (Cera de abeja): En la obtención de la cera de abeja, en forma de bloque, como resultado del proceso en el fusor solar que se investigó previamente. El proceso para obtener la cera de abeja es el siguiente: para empezar, se divide el bloque de cera en partes pequeñas aproximadamente de 10 g, ver fotografía 2, esto con el fin de cambiar su estado a líquido evitando afectaciones por alta temperatura en trozos grandes y utilizar el proceso de purificación por decantación; la temperatura de esta operación oscila entre 70 y 75 (°C) de acuerdo con la investigación previa. Siguiendo con el proceso, la cera en estado líquido se debe verter en un recipiente de plástico convencional a una temperatura exacta de 69 (°C) a una velocidad muy lenta evitando turbulencia y generación de burbujas, controlado por dispositivos de sensores de temperatura y velocidad respectivamente. Este proceso se realiza varias ocasiones, en promedio 3 veces sacando residuos en un 60% y obteniendo una cera de abeja con una pureza de aproximadamente del 95%.

Fotografía 2. Purificación cera de abeja.



Realizado el proceso de decantación se prosigue con la fabricación de la placa para modelar las muestras, teniendo en cuenta las dimensiones que se establecen en la norma ASTM 3039¹⁷ y ASTM 7264¹⁵ para tracción y flexión respectivamente, donde se utilizó un molde de 18cmx10cm de madera construido con el fin de que pudiera ser desarmable; El interior del molde incluida la tapa se cubre con papel parafinado con el fin de obtener superficies planas y evitar que la cera se adhiera a la madera debido a la temperatura y velocidad de ingreso, ver fotografía 3.

Fotografía 3. Molde con papel parafinado.



Para el proceso de fabricación de la placa se debe verter la cera en el molde a una temperatura de 67 a 68 (°C) de manera lenta para no ocasionar turbulencia evitando generación de burbujas y también para no producir transferencia de masa entre el papel y la cera, de igual manera se controla por los mismos sensores ya mencionados. Por último, se prosigue a tapar el molde y hacer una leve presión con el rodillo de goma, finalmente se utiliza un nivel digital para verificar que la placa quede nivelada y no tener variaciones en el espesor.

3.2.3. Material Compuesto (Fibra con cera de abeja): Para la obtención del material compuesto que está conformado por fibra y matriz (la fibra de bijao y la cera de abeja respectivamente) se usa el mismo proceso mencionado en el título anterior con las respectivas medidas especificadas bajo la norma ASTM 3039¹⁷ y ASTM 7264¹⁵ para tracción y flexión respectivamente.

Para la obtención de las muestras se verte en el molde la cera de abeja hasta cubrir por completo el asiento con una masa aproximada de 24 g, luego se le agrega fibra (hoja de bijao) con una masa de 2 g y para terminar se verte la cera de abeja hasta que la hoja queda totalmente cubierta con una masa de iguales proporciones de 24 g, ver fotografía 4, para una masa total de 50 g posteriormente se tapa el molde observando que la cera no se haya solidificado para evitar rupturas en la superficie de la placa, con un rodillo de goma se hace una leve presión en la tapa para evitar variaciones en el espesor y finalmente se usa un nivel digital para verificar que la placa este nivelada, este proceso asegura que el espesor de la placa sea de 3 mm.

Fotografía 4. Proceso de obtención de placa.



3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.

La caracterización mecánica de estos materiales se llevó a cabo bajo las normas que se enuncian a continuación:

3.3.1. Ensayo de tensión para fibra: Este ensayo mecánico se ejecutó bajo la norma ASTM D882-12, en la maquina universal de ensayos marca MTS modelo Bionix 370.02 del laboratorio de ensayos mecánicos ver fotografía 5. Se trabajó a una velocidad de deformación 1 mm/min debido a que la elongación es baja.

Fotografía 5. Maquina universal de ensayos MTS.



3.3.2. Ensayo de tensión para cera de abeja y material compuesto: Este ensayo mecánico se ejecutó bajo la norma ASTM D3039-17, igualmente en la maquina universal de ensayos marca MTS modelo Bionix 370.02 del mismo laboratorio. De acuerdo con el procedimiento de la norma en el ítem de velocidad de testeo, se establece una velocidad de 1 mm/min.

3.3.3. Ensayo de flexión para cera de abeja y material compuesto: El ensayo de flexión se ejecutó en la misma maquina universal de ensayos marca MTS modelo Bionix modelo 370.02 del mismo laboratorio bajo la norma ASTM D7264-15. Se uso el ensayo de flexión con 3 puntos de apoyo a una velocidad de 5 mm/min, porque del estudio de la norma se sabe que la falla siempre sucede en el apoyo intermedio donde el momento flector es máximo.

3.3.4. Análisis de fractografía: El estudio de la fractografía se ejecutó en el laboratorio de microscopia en la sede Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG) de la Universidad. Se analizó, el área fracturada de la probeta de tracción y flexión mediante un Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650; Las muestras se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón y se recubrieron con oro con un espesor de 100 nanómetros, mediante la técnica de pulverización catódica en el equipo de recubrimiento marca Quorum 150 ES, y con esto crear una superficie conductora, ver fotografía 6.

Fotografía 6. Microscopio electrónico de barrido.



3.4. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El diseño de experimento está enfocado a las variables de entrada (independientes) y las variables de salida (dependientes) que están involucradas en el proceso.

Hipótesis 1: Se comprobará que el material compuesto obtenido tiene mayor resistencia a la tensión que la cera de abeja sin reforzar.

Hipótesis 2: Se comprobará que el material compuesto obtenido tiene mayor resistencia a la flexión que la cera de abeja sin reforzar.

Figura 1. Esquema diseño de experimento.

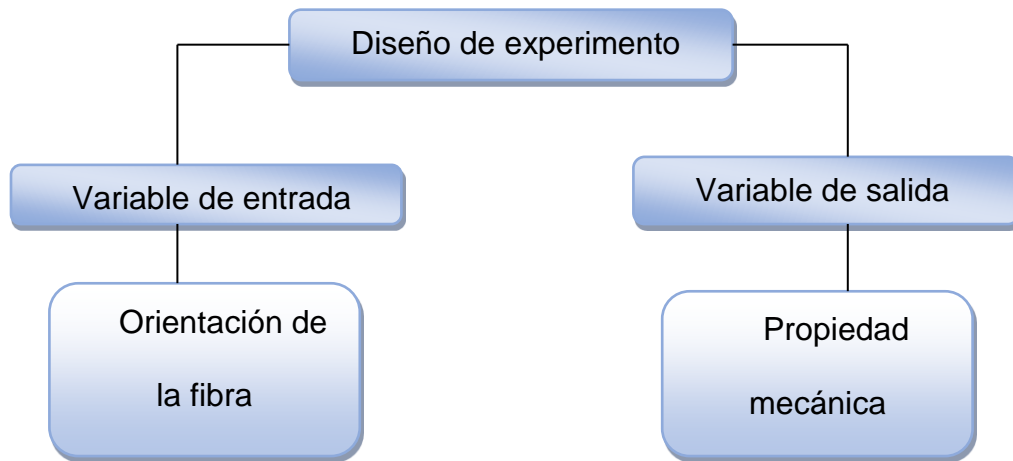
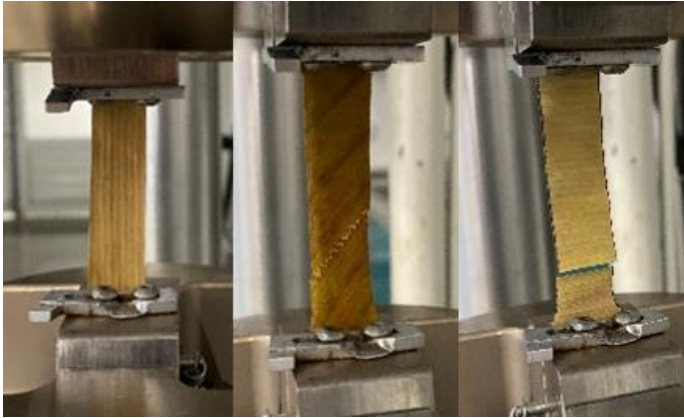


Tabla 1. Diseño de experimento.

Experimento	Orientación de la fibra
1	0°
2	45°
3	90°

De cada uno de los experimentos de la tabla 1. Se elaboraron 6 probetas, 3 para los ensayos de tracción y 3 para los ensayos de flexión, para un total de 18 experimentos. A continuación, se muestran la fotografía que hace referencia a cada orientación.

Fotografía 7. Orientación de fibras de Bijao.



4. RESULTADOS.

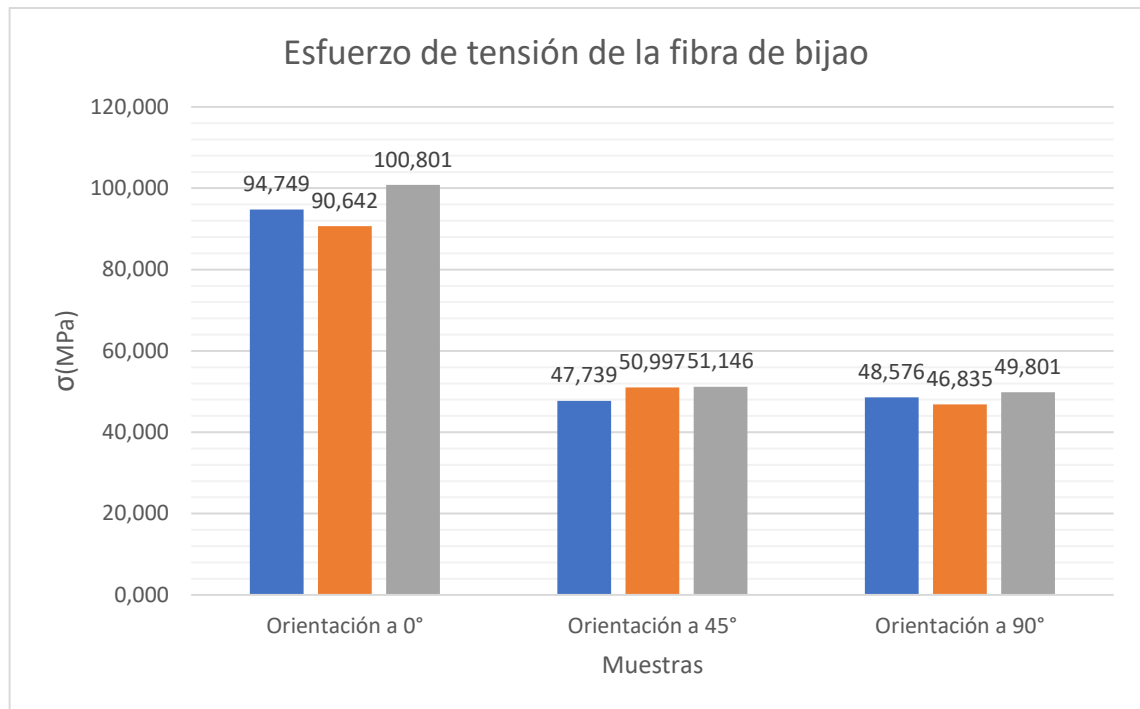
A continuación, se ilustran los resultados durante el proceso metodológico planteado en el capítulo anterior. Se enuncia de igual manera, la descripción relevante de cada resultado.

4.1. CARACTERIZACIÓN SEGÚN NORMA ASTM 882-12.

Se obtuvieron las propiedades mecánicas a tensión utilizando la máquina universal de ensayos MTS modelo Bionix 370.02, usando la norma ASTM 882-12. Analizando 2 lotes de muestras.

4.1.1. Caracterización a tensión fibra de bijao: La caracterización de la fibra de bijao a tensión se comienza por tomar 9 probetas, 3 para cada orientación de fibra de 0°, 45° y 90°, para ensayarlas en la máquina universal de ensayos MTS modelo Bionix 370.02, donde se obtuvieron los datos de fuerza axial (Pa) y deformación (mm), que son necesarios para calcular el esfuerzo de tensión dividiendo esta fuerza entre el área inicial de las muestras. Los datos obtenidos se pueden apreciar en la Figura 2.

Figura 2. Esfuerzo de tensión para la fibra orientada a 0°, 45° y 90°.



Las muestras con orientación de fibra a 0°, como se observa en la Figura 2, superan en esfuerzo de tensión a sus equivalentes en alrededor de 50 MPa, y será este lote de muestras el que aporte las propiedades mecánicas a partir de promediar la información obtenida.

Figura 3. Grafica esfuerzo-deformación a tensión de la fibra orientada a 0°.



En la Figura 3, se observa el comportamiento de la curva donde el esfuerzo máximo a tensión que soporto la fibra de bijao orientada a 0° en promedio fue de 89,976 MPa, con una deformación unitaria respectiva de 0,007 mm/mm, todo esto con una curva de tendencia lineal.

En la Tabla 2, se muestran los valores de las propiedades mecánicas a tensión estudiadas en base a la norma, con los datos aportados del lote de muestras de fibra orientada a 0°.

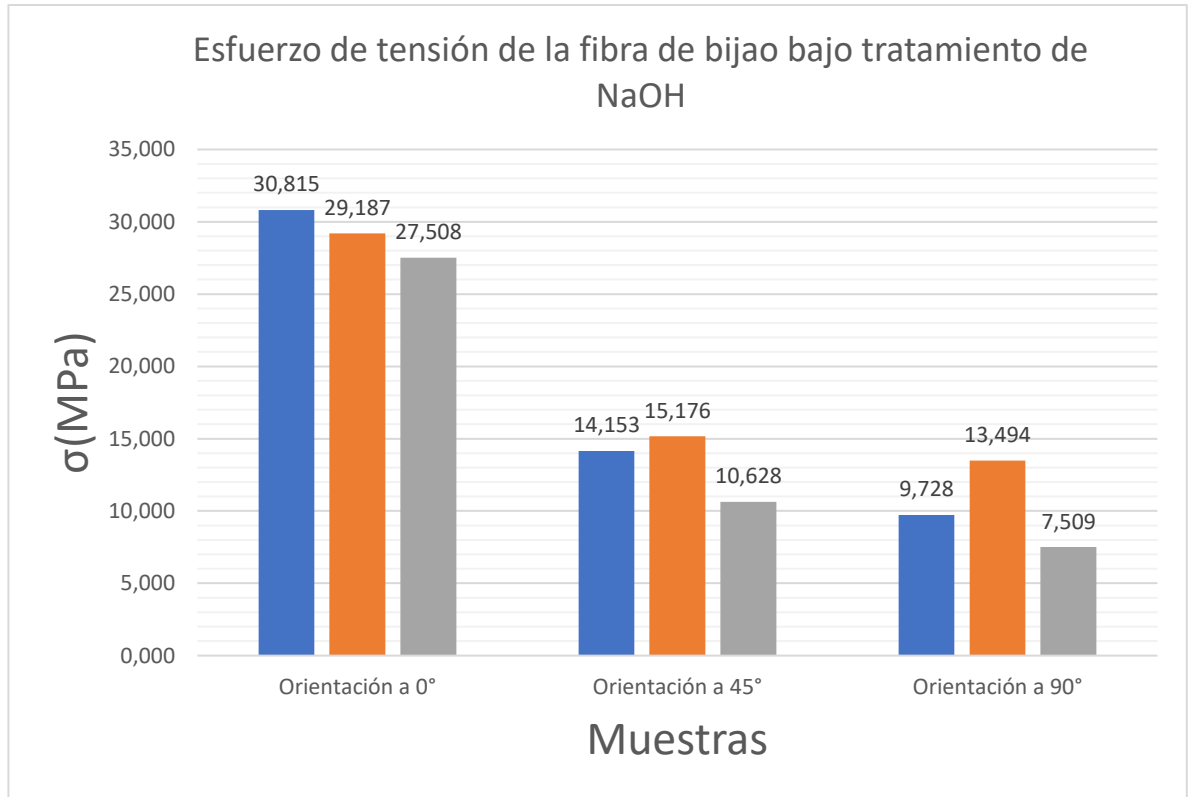
Tabla 2. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 882-12, para la fibra orientada a 0°.

Composición	Resistencia tensión (MPa)	Porcentaje elongación (%)	Módulo Elasticidad (GPa)
Fibra a 0°	89,97	0,78	12,13

La Tabla 2, proporciona los valores de las propiedades mecánicas obtenidas del lote de muestras de fibra orientada a 0°. Estos valores se hallaron de la siguiente forma con base en la norma: la resistencia a la tracción, es el resultado de la división entre esfuerzo máximo de tensión y el área transversal original de la muestra; el porcentaje de elongación o alargamiento en la ruptura es la fracción entre la extensión máxima en el momento de la ruptura y la longitud inicial de la muestra multiplicada por 100; y por último, el módulo de elasticidad se calcula dibujando una tangente a la porción lineal inicial de la curva en mención y con la diferencia entre el punto de contacto más alto de esfuerzo de tensión con el más bajo para dividirlo entre la diferencia de deformación correspondiente.

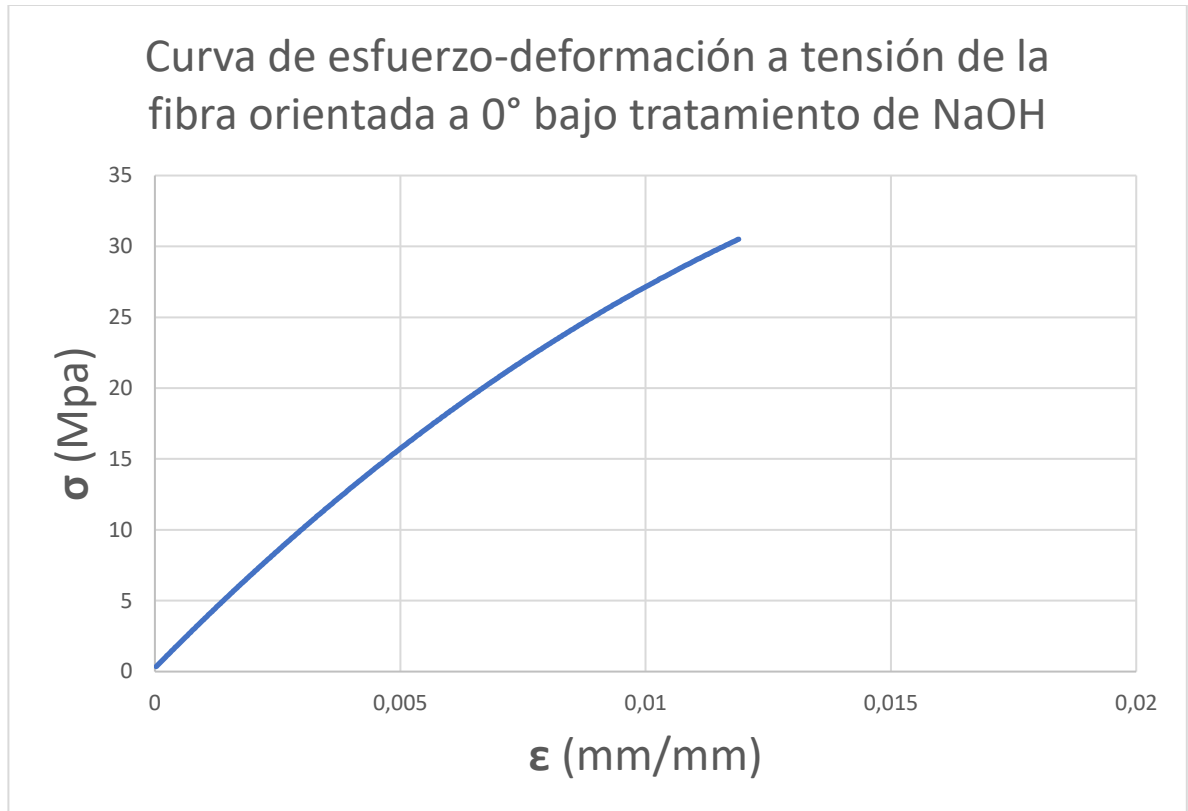
4.1.2. Caracterización a tensión fibra de bijao con tratamiento de NaOH: La caracterización de la fibra de bijao con tratamiento de NaOH a tensión se realiza acorde al procedimiento de la sección 4.1.1. En la figura 4 se observan los resultados para el esfuerzo de tensión para este lote de muestras bajo tratamiento de NaOH.

Figura 4. Esfuerzo de tensión para la fibra orientada a 0°, 45° y 90°, bajo tratamiento de NaOH.



Las muestras con orientación de fibra a 0°, como se observa en la Figura 4, de nuevo en promedio aumentan la tensión de alrededor de 15 (MPa) a sus equivalentes, y será este lote de muestras el que aporte las propiedades mecánicas a partir de promediar su información.

Figura 5. Grafica esfuerzo-deformación a tensión de la fibra orientada a 0° con tratamiento de NaOH.



En la Figura 5, se observa la representación gráfica del esfuerzo máximo a tensión que soporto la fibra de bijao orientada a 0° bajo tratamiento de NaOH en promedio fue de 30,414 MPa, con una deformación unitaria respectiva de 0,012 mm/mm; Sin embargo, en este caso se observa una curva no lineal.

De igual modo, en la Tabla 3 se muestran los valores de las propiedades mecánicas a tensión estudiadas en base a la norma, con los datos aportados del lote de muestras de fibra orientada a 0° bajo el tratamiento de NaOH.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 882-12, para la fibra orientada a 0° bajo tratamiento de NaOH.

Composición	Resistencia tensión (MPa)	Porcentaje elongación (%)	Módulo Elasticidad (GPa)
Fibra a 0°	30,41	1,19	2,52
Fibra a 0° SIN TRATAMIENTO	89.97	078	12.13

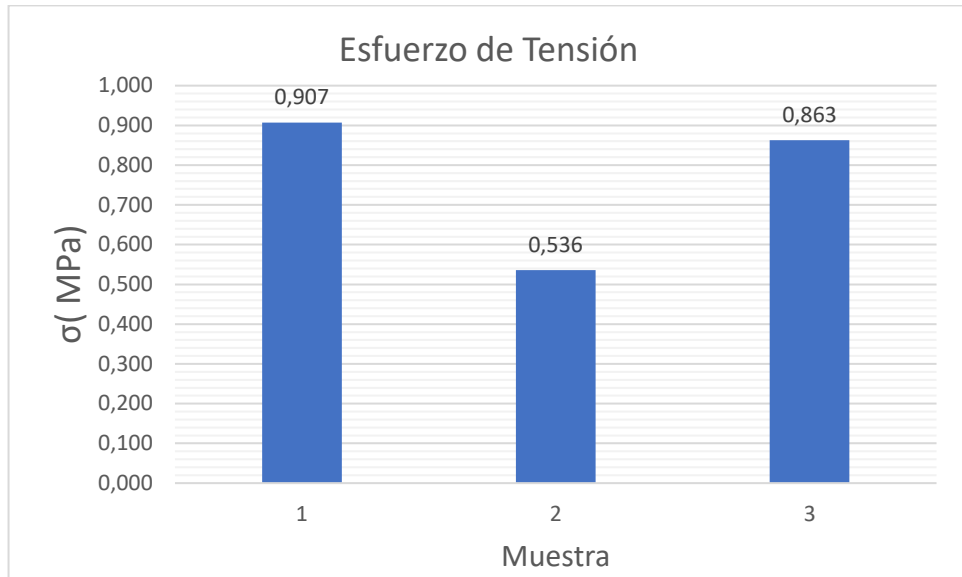
Como se describió en la Tabla 2, de las propiedades mecánicas para la fibra con orientación a 0°, la Tabla 3 presenta el mismo empleo de resolución. Y los valores obtenidos para cada propiedad serán analizados en el siguiente capítulo.

4.2. CARACTERIZACIÓN SEGÚN NORMA ASTM 3039-17.

Se obtuvieron las propiedades mecánicas a tensión de la cera de abeja y del compuesto polimérico, utilizando la máquina universal de ensayos MTS modelo Bionix 370.02, bajo la norma ASTM 3039-17. Analizando 2 lotes de muestras.

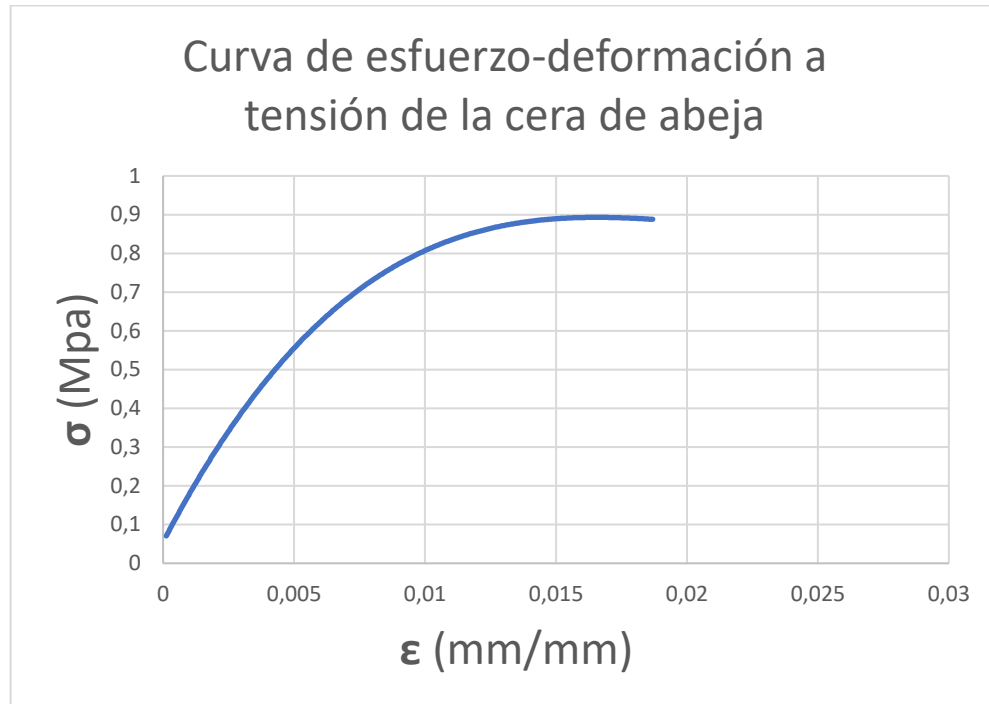
4.2.1. Caracterización a tensión cera de abeja: La caracterización a tensión en este material comienza por tomar 3 probetas de cera de abeja, para ensayarlas en la maquina universal de ensayos MTS modelo Bionix 370.02, en donde se obtuvieron los datos de fuerza axial (Pa) y deformación (mm), que son necesarios para calcular el esfuerzo de tensión dividiendo esta fuerza entre el área inicial de las muestras. Los datos obtenidos se pueden apreciar en la Figura 6.

Figura 6. Esfuerzo de tensión para la cera de abeja.



Como se evidencia en la Figura 6, la máxima tensión sucede con la muestra 1. Sin embargo, se realiza el promedio de las 3 muestras en cuanto a la información obtenida del laboratorio para graficar la curva esfuerzo de tensión contra deformación unitaria ilustrada en la Figura 7.

Figura 7. Grafica esfuerzo-deformación a tensión de la cera de abeja.



En esta oportunidad, en la Figura 7, se observa la representación gráfica del esfuerzo máximo a tensión que soporto la cera de abeja en promedio fue de 0,885 MPa, con una deformación unitaria respectiva de 0,019 mm/mm; Además, se observa una curva que obedece a un material dúctil.

A continuación, en la Tabla 4 se muestran los valores de las propiedades mecánicas a tensión, estudiadas en base a la norma con los datos aportados del lote de muestras de cera de abeja.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 3039-17, para la probeta de cera de abeja.

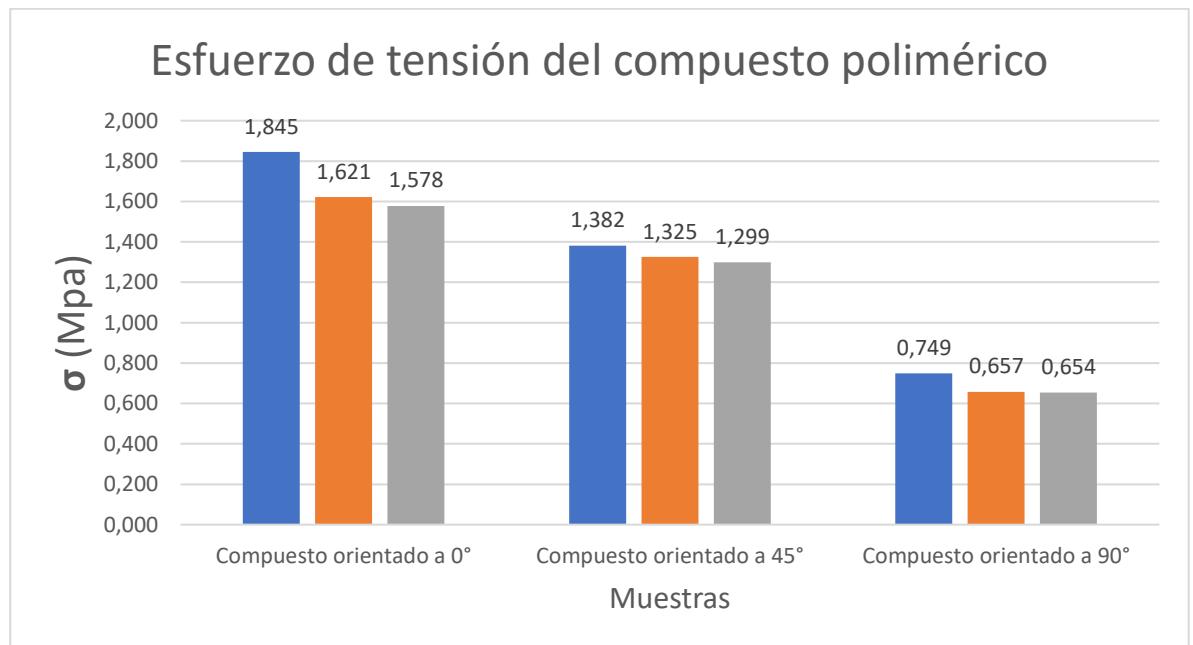
Composición	Esfuerzo de tensión (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo Elasticidad (MPa)	Coefficiente de Poisson
Cera de abeja	0,88	0,019	46,41	0.474

Las propiedades mecánicas obtenidas del lote de muestras de cera de abeja que se muestran en la Tabla 4, se obtuvieron de la norma en donde cada propiedad se halla de la siguiente manera: Para el esfuerzo de tensión, se fracciona la fuerza en el i-esimo punto entre el área de la sección transversal. Seguido se encuentra la deformación unitaria es resultado del desplazamiento del extensómetro dividido en la longitud inicial del extensómetro. Contiguo, el módulo de elasticidad es producto de la diferencia en la tensión de tracción aplicada entre los dos puntos de deformación de la Tabla 3 de la norma ASTM 3039-17. Por último, para el coeficiente de Poisson se selecciona el rango de deformación longitudinal de la Tabla 3 de la norma y se determina la deformación transversal en cada una de las deformaciones longitudinales, luego se usa la formula (9) de la norma.

4.2.2. Caracterización a tensión material compuesto polimérico: Para caracterizar el material compuesto a tensión, se comienza por tomar 9 probetas, 3 para cada orientación de fibra de 0°, 45° y 90°, para ensayarlas en la maquina universal de ensayos MTS modelo Bionix 370.02, en donde se obtuvieron los datos de fuerza axial (Pa) y deformación (mm), que se usan para calcular el esfuerzo de

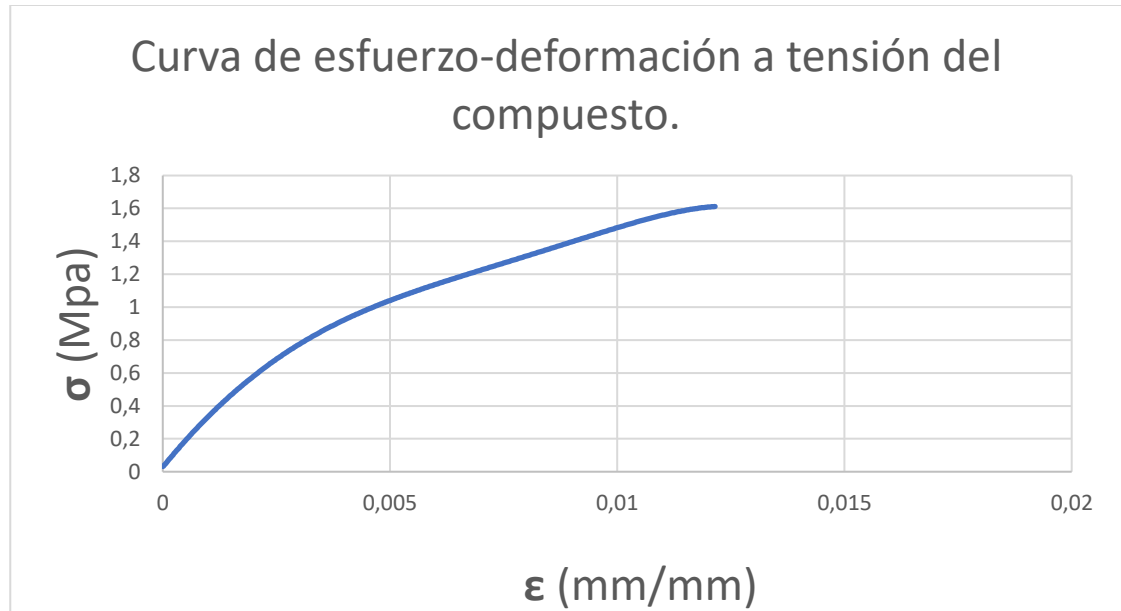
tensión dividiendo esta fuerza entre el área inicial de las muestras. Los datos obtenidos se pueden apreciar en la Figura 8.

Figura 8. Esfuerzo de tensión para cada compuesto con fibra orientada a 0°, 45° y 90°.



Las muestras de material compuestos con orientación de fibra a 0°, como se observa en la Figura 8, promedian en mayor esfuerzo a tensión a los otros dos lotes de muestras, y aunque tienen propiedades significativas será este lote de muestras el que aporte las propiedades mecánicas a partir de promediar la información obtenida.

Figura 9. Grafica esfuerzo-deformación a tensión del compuesto con fibra orientada a 0°.



La gráfica esfuerzo de tensión contra deformación unitaria del material compuesto con fibra orientada a 0°, ilustrada en la Figura 9, muestra que el esfuerzo máximo que soporto la cera de abeja en promedio fue de 1.624 MPa, con una deformación unitaria respectiva de 0,012 mm/mm; y de nuevo, se observa que la curva mostrada tiene comportamiento dúctil.

En la Tabla 5 se muestran los valores de las propiedades mecánicas a tensión, estudiadas en base a la norma con los datos aportados del lote de muestras del material compuesto.

Tabla 5. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 3039-17 para el material compuesto con fibra orientada a 0°.

Composición	Esfuerzo de tensión (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo Elasticidad Primario (MPa)	Módulo Elasticidad Secundario (MPa)	Coefficiente de Poisson
Cera de abeja + 0°	1,62	0,012	219.39	48.46	0.473
Cera de abeja	0.088	0.019	46.41		0.474

La descripción de la Tabla 5 es similar a la Tabla 4, puesto que son las mismas propiedades mecánicas obtenidas de la norma ASTM 3039-17, y en donde la diferencia claramente son los valores que se analizarán en el siguiente capítulo.

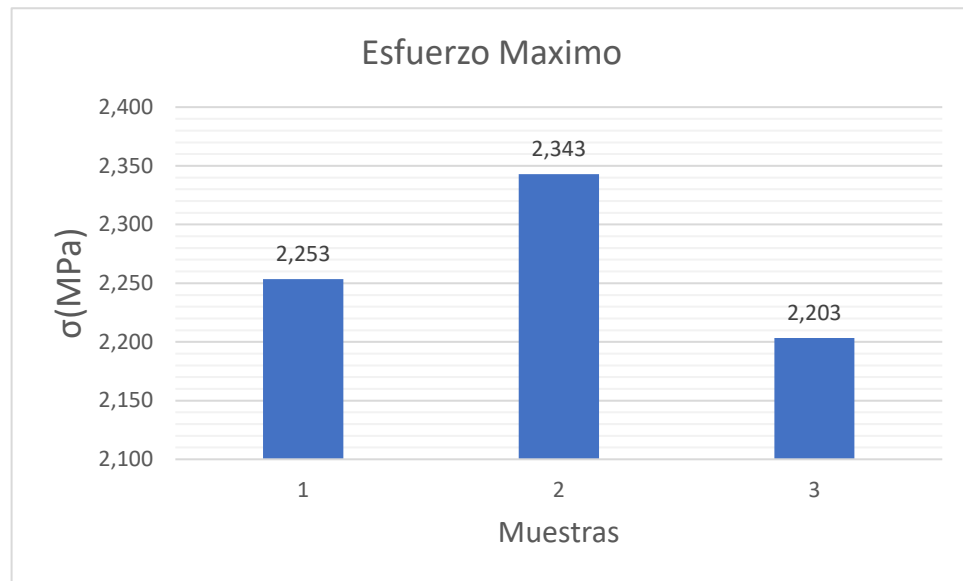
4.3. CARACTERIZACIÓN SEGÚN NORMA ASTM 7264-15.

Se obtuvieron las propiedades mecánicas a flexión de la cera de abeja y del material compuesto (cera de abeja reforzada con fibra), utilizando la máquina universal de ensayos MTS modelo Bionix 370.02, bajo la norma ASTM 882-12. Esto con el ánimo de analizar 2 lotes de muestras.

4.3.1. Caracterización a flexión de cera de abeja: Para caracterizar a flexión este material, se elaboraron 3 probetas de cera de abeja, donde inicialmente se obtienen de la máquina universal de ensayos MTS modelo Bionix 370.02, y con las

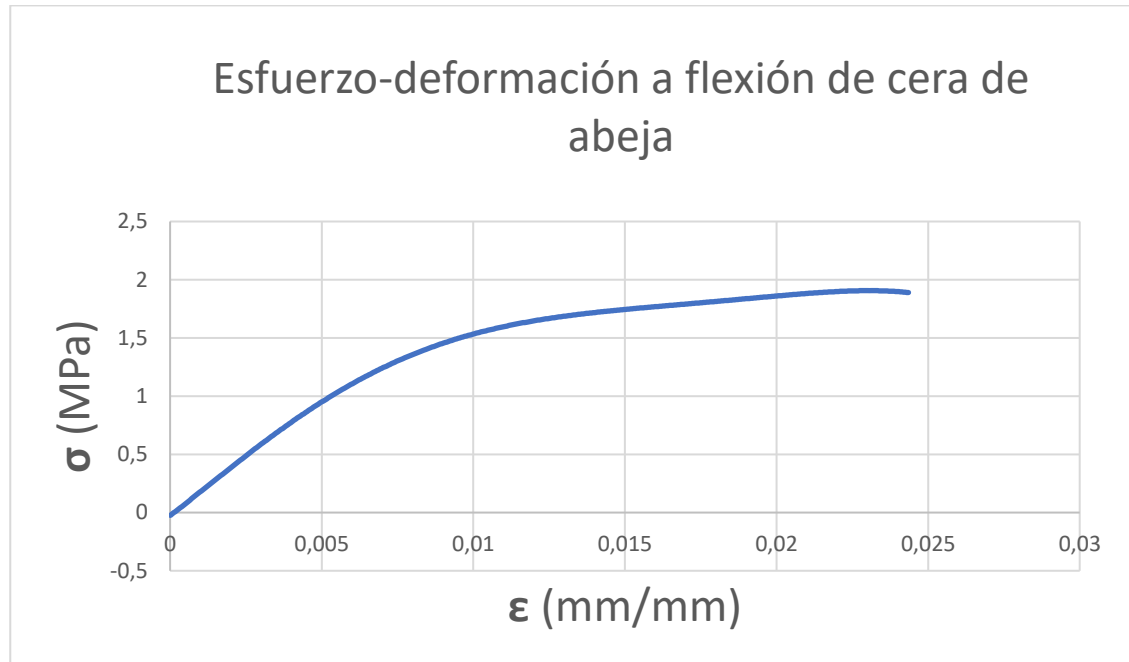
dimensiones de las muestras junto con la norma ASTM 7264-15 se obtienen los siguientes datos que se muestran en la Figura 10.

Figura 10. Esfuerzo de flexión para la cera de abeja.



Como se evidencia la máxima flexión sucede con la muestra 2. Sin embargo, se realiza el promedio de las 3 muestras en cuanto a la información obtenida del laboratorio.

Figura 11. Grafica esfuerzo-deformación a flexión de cera de abeja.



La curva esfuerzo contra deformación a flexión de la cera de abeja ilustrada en la Figura 11, muestra que el esfuerzo máximo a tensión que soporto la cera de abeja en promedio fue de 1.990 MPa, con una deformación unitaria respectiva de 0,024 mm/mm; Además, se observa una curva que en la parte final tiene una zona frágil. En la Tabla 6 se muestran los valores de las propiedades mecánicas a flexión, estudiadas en base a la norma con los datos aportados del lote de muestras de cera de abeja.

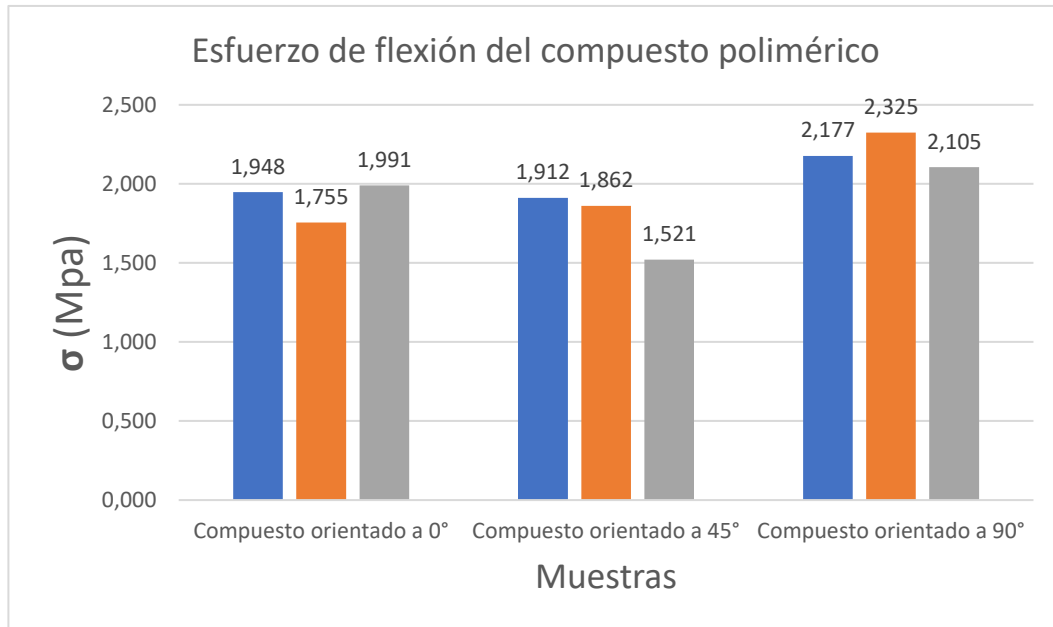
Tabla 6. Propiedades mecánicas de la norma ASTM 7264-15, para la muestra de cera de abeja.

Composición	Esfuerzo de flexión a la fractura (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo Elasticidad (MPa)
Cera de abeja	1,99	0,024	80,49

Las propiedades mecánicas obtenidas del lote de muestras de cera de abeja que se muestran en la Tabla 6, se obtuvieron de la norma en donde cada propiedad se halla de la siguiente manera: Para el esfuerzo de flexión, la tensión máxima en la superficie externa ocurre en la mitad del tramo y se puede calcular en cualquier punto de la curva esfuerzo deflexión mediante la ecuación (1) de la norma. Para la deformación unitaria la cual también sucede en la superficie externa y se calcula con la ecuación (3) de la norma. Finalmente, el módulo de elasticidad de la viga en flexión es la relación del rango de tensión con el rango de deformación correspondiente.

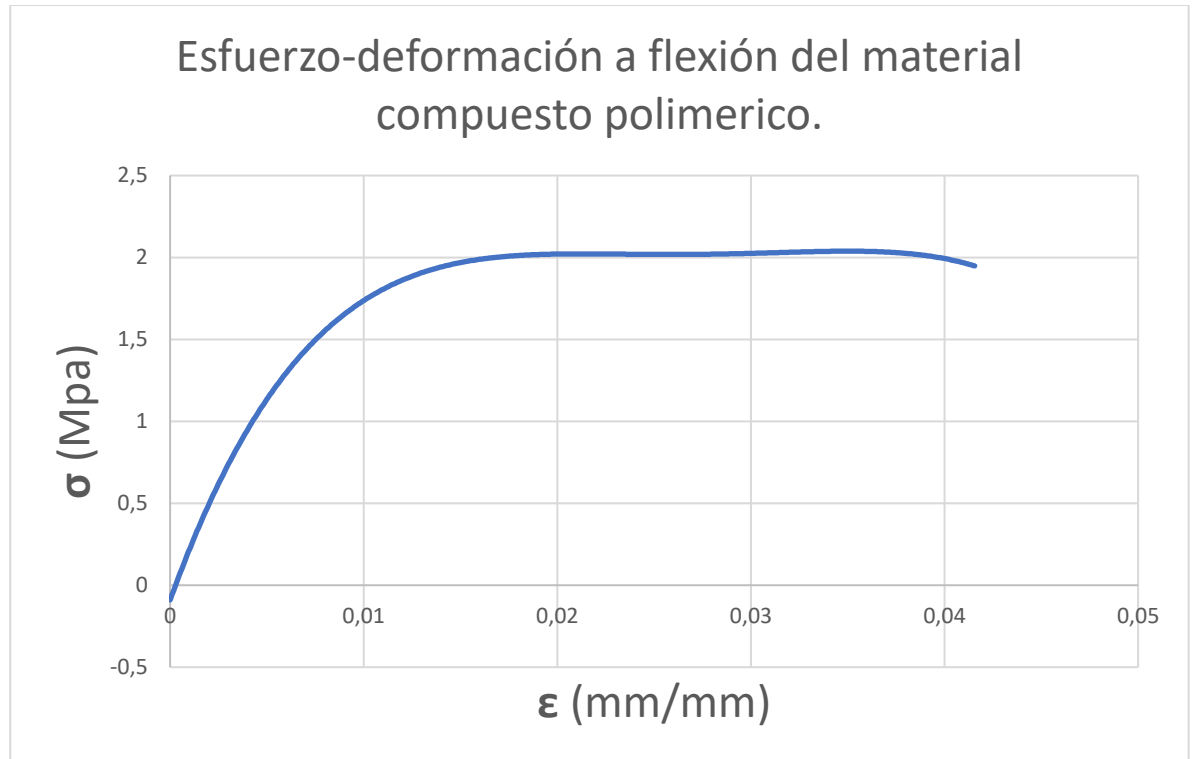
4.3.2. Caracterización a flexión material compuesto polimérico: Para caracterizar el material compuesto a flexión, se comienza por tomar 9 probetas, 3 para cada orientación de fibra de 0°, 45° y 90°, para ensayarlas en la maquina universal de ensayos MTS modelo Bionix 370.02, en donde se obtuvieron los datos de fuerza axial (Pa) y deformación (mm), que se usan para calcular el esfuerzo de tensión dividiendo esta fuerza entre el área inicial de las muestras. Los datos obtenidos se pueden apreciar en la Figura 12.

Figura 12. Resultados esfuerzo máximo a flexión compuesto polimérico.



Las muestras de material compuestos con orientación de fibra a 90°, como se observa en la Figura 12, promedian en mayor esfuerzo a tensión a los otros dos lotes de muestras, y aunque tienen propiedades significativas será este lote de muestras el que aporte las propiedades mecánicas a partir de promediar la información obtenida.

Figura 13. Grafica esfuerzo-deformación a flexión del material compuesto con fibra orientada a 90°.



La gráfica con la curva de esfuerzo de flexión contra deformación unitaria del material compuesto con fibra orientada a 90°, ilustrada en la Figura 13, muestra que el esfuerzo máximo que soporto el material compuesto en promedio fue de 2,118 MPa, con una deformación unitaria respectiva de 0,041 mm/mm.

En la Tabla 7 se muestran los valores de las propiedades mecánicas a flexión, estudiadas en base a la norma con los datos aportados del lote de muestras del material compuesto de fibra orientado a 90°.

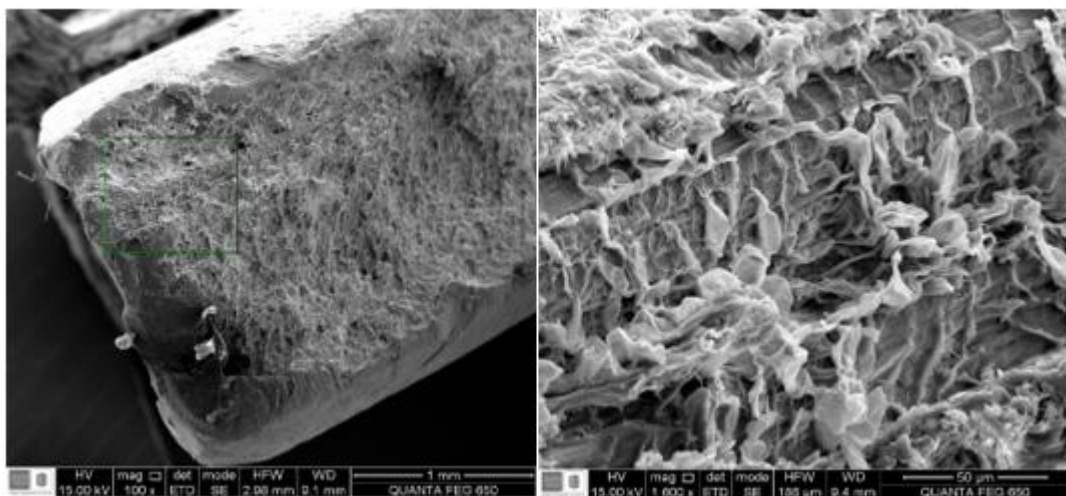
Tabla 7. Resultados de las propiedades mecánicas con base al ensayo de flexión de la cera de abeja más la fibra a 90°.

Composición	Máximo esfuerzo de flexión (MPa)	Deformación máxima (mm/mm)	Módulo Elasticidad (MPa)
Cera de abeja + Fibra a 90°	2,12	0,041	67,37
Cera de abeja	1,99	0,024	80,49

Las propiedades mecánicas que se aprecian en la Tabla 7, se obtuvieron de la norma ASTM 7264-15 aplicadas al material compuesto polimérico de fibra orientada a 45°, donde cada propiedad se halló de la misma forma que se describió en la Tabla 6.

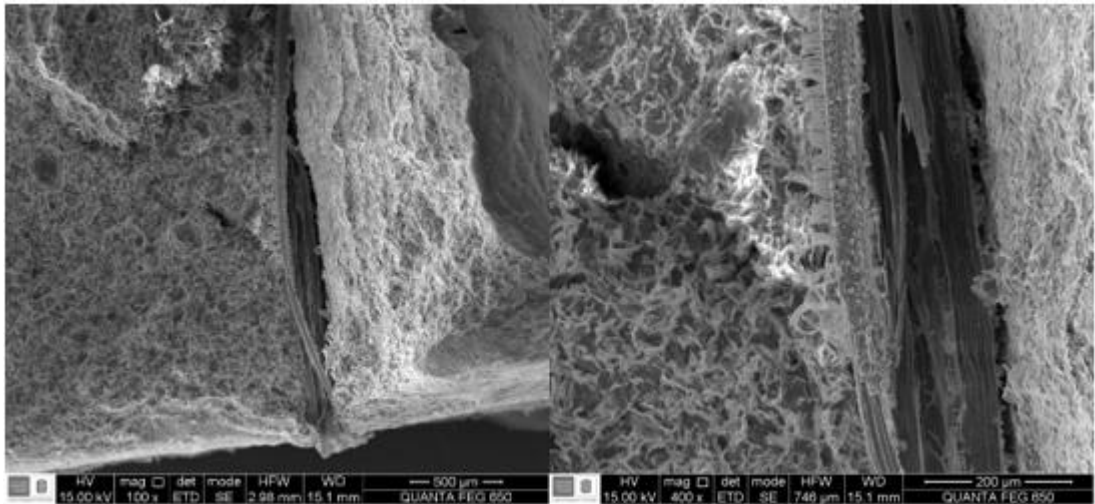
4.4. FRACTOGRAFIA.

Fotografía 8. Fractografía de la probeta de cera de abeja y fibra orientada a 0°.



La fotografía 7 muestra detalladamente la estructura del material compuesto polimérico de cera de abeja y fibra orientada a 0°, tomada desde el microscopio electrónico de barrido para el método de tensión.

Fotografía 9. Fractografía de la probeta cera de abeja y fibra orientada a 90°.



La fotografía 8 muestra detalladamente la estructura del material compuesto polimérico de cera de abeja y fibra orientada a 90°, tomada desde el microscopio electrónico de barrido para el método de flexión.

4.5. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

4.5.1. Diseño del experimento a tensión

Tabla 8. Resultados Esfuerzo de Tensión

RESULTADOS ESFUERZO DE TENSION					
Material compuesto Vs Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Totales	Promedios
Sin fibra	0,907	0,836	0,863	2,606	0,869
Orientación a 0°	1,845	1,621	1,578	5,044	1,681
Orientación a 45°	1,382	1,325	1,299	4,006	1,335
Orientación a 90°	0,749	0,657	0,654	2,060	0,687
Total, por bloque	4,883	4,439	4,394	13,716	4,572

Resultados obtenidos para tensión.

4.5.2. Diseño de experimento a Flexión

Tabla 9. Resultados Esfuerzo de Flexión

RESULTADOS ESFUERZO DE FLEXION					
Material compuesto Vs Muestra	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Totales	Promedios
Sin fibra	2,253	2,343	2,203	6,799	2,266
Orientación a 0°	1,948	1,755	1,991	5,694	1,898
Orientación a 45°	1,912	1,862	1,521	5,295	1,765
Orientación a 90°	2,177	2,325	2,105	6,607	2,202
Total, por bloque	8,290	8,285	7,820	24,395	8,132

Resultados obtenidos para Flexión.

5. ANALISIS DE RESULTADOS.

A continuación, se presenta el análisis de los resultados del capítulo anterior, enunciados por cada norma (ASTM 882-12, ASTM 3039-17 y ASTM 7264-15), las cuales se analizarán independientemente.

5.1. NORMA ASTM 882-12.

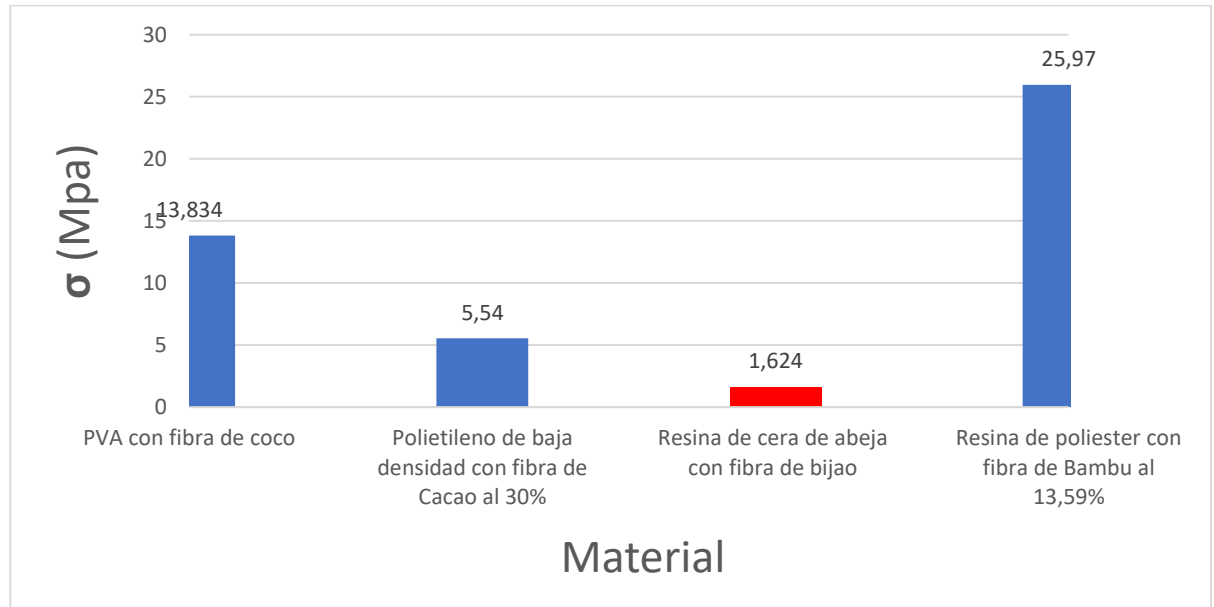
La fibra a 0° de acuerdo con la Tabla 2 y 3, es la mejor opción ya que posee un esfuerzo a la tensión promedio de 89,976 MPa y 30,41 MPa respectivamente por motivo de que la fibra esta paralela al esfuerzo y hay una menor cantidad de concentradores de esfuerzo a comparación a las fibras con orientación de 90° y 45° ya que la fibra se encuentra transversal e inclinada al esfuerzo de tensión axial. La influencia del tratamiento de NaOH sobre la fibra hace que esta pierda en promedio la tercera parte de su esfuerzo máximo de tensión además también pierde módulo de elasticidad en una décima parte, esto se evidencia en el valor del módulo de elasticidad que presenta la Tabla 2 con un valor de 12,13 (GPa) en comparación con la Tabla 3 donde se tiene un valor de 2,52 (GPa), pero se le agregan propiedades como la ductilidad que se observan en la Figura 5, en comparación a lo observado en la Figura 3, en donde el comportamiento de la curva hace referencia a un material frágil, como consecuencia del aumento en el porcentaje de elongación obtenido en la Tabla 2 de 0,78% respecto a la Tabla 3 con un valor de 1,19%, a menor elongación mayor fragilidad. Como se observa el tratamiento alcalino causa cambios en las propiedades mecánicas del material, sin embargo, se utiliza la fibra

con una concentración elevada de NaOH permitiendo que la fibra-polímero sea una unión más íntima.

5.2. NORMA ASTM 3039-17.

El esfuerzo de tensión máximo promedio que se observa en la Tabla 5 de 1,62 MPa aproximadamente dobla al esfuerzo de tensión máximo promedio que se observa en la Tabla 4 de 0,88 MPa. En la Figura 7, inicialmente la cera de abeja se deforma elásticamente, perteneciente a un material frágil con una ligera zona dúctil y dicho módulo de elasticidad tiene un valor de 46.41 (MPa), evidentemente mucho menor que en el material compuesto. En este orden de ideas el resultado del material compuesto ilustrado en la figura 9, tanto la fibra como la matriz se deforman elásticamente, formando dos zonas de elasticidad, donde la primera zona de elasticidad se estima en un valor 219.392 (MPa) y la segunda zona de elasticidad con un valor de 292.087 (MPa). Se analiza que al adicionar la fibra se obtiene una mayor rigidez, por lo tanto, el material compuesto con fibra orientada a 0° tiene un mayor módulo de elasticidad que la cera de abeja y su deformación unitaria disminuye proporcional al aumento de la rigidez. También se deduce que la resistencia del material compuesto está limitada por la tensión de falla de la cera de abeja ya que el valor del esfuerzo máximo de la falla en el material compuesto es cercano al valor del esfuerzo máximo de la cera de abeja. De acuerdo con el valor del coeficiente de Poisson de 0.474 para la cera de abeja y 0.473 para el compuesto se determina que el material es blando ya que su valor se aproxima a 0.5.

Figura 14. Resultado de esfuerzo de tensión de principales fibras.



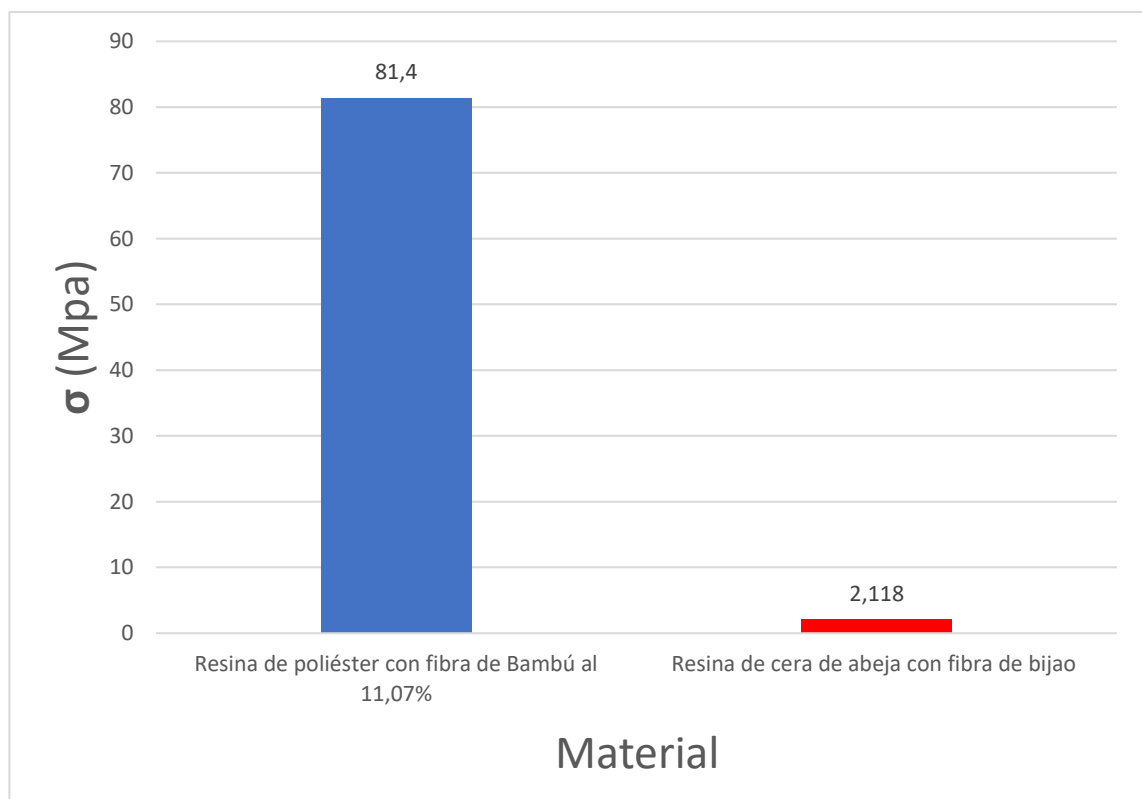
En la gráfica se puede observar el lugar en el que se encuentra el material compuesto de fibra de bijao y cera de abeja, el cual se encuentra por debajo de las comparaciones debido a que su composición es natural sin ningún tipo de aditivo sintético.

5.3. NORMA ASTM 7264-15.

El esfuerzo máximo a flexión presenta una ligera variación entre la cera de abeja y el material compuesto orientado a 90° cuyos valores son de 1.99 (MPa) y 2.118(MPa) respectivamente. Sin embargo, el material compuesto orientado a 0° y 45 ° no presentan una variación relativa respecto de la cera de abeja. Ahora al añadir la fibra orientada a 90° adquiere un comportamiento más dúctil el cual disminuye su módulo de elasticidad de 80.497 (MPa) a 67.371 (MPa). Por otro lado, analizando el comportamiento mecánico de las figuras 11 y 13, se puede observar

que su comportamiento difiere de la zona de elasticidad, ya que en la cera de abeja no existe y para el material compuesto tiene una zona de fluencia antes de fallar. La consecuencia que tiene el material compuesto con la zona de fluencia es que aumenta su deformación unitaria por lo que el material tiende a ser dúctil en ese momento. Dicha deformación unitaria del material compuesto mostrado en la tabla 7 representa aproximadamente el doble del valor obtenido en la cera de abeja mostrada en la tabla 6, con 0.041 (mm/mm) y 0.024 (mm/mm) respectivamente.

Figura 15. Resultado de esfuerzo de flexión de principales fibras.



De la comparación en la figura 15 se evidencia el bajo esfuerzo de flexión que tiene el material compuesto de cera de abeja con fibra de bijao en comparación de la

resina de poliéster con fibra de bambú, debido a que su composición es natural sin ningún tipo de aditivo sintético.

5.4. RELACIÓN ENTRE LA FRACTURA Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS: MÉTODO DE LA FRACTOGRAFIA.

5.4.1. Fractografía según la Norma ASTM 3039-17: En la fotografía 8 se ven los patrones de ramificación de la cera de abeja que se mueven a través de la fibra en dirección transversal a esta, mostrando que el material fallo por desgarre, debido que se crearon hilos en dirección perpendicular a la superficie, además de que el área de los hoyuelos es pequeña en comparación a toda el área transversal de corte, de acuerdo con esto el material es de baja rigidez, como lo enuncia la norma ASTM.

Se crean niveles de dimensiones similares al espesor de la fibra donde existen formaciones tubulares que son creadas por el ensayo a tensión, en la separación se crean unas ramificaciones o surcos donde se observa la unión entre cera de abeja y la fibra.

5.4.2. Fractografía según la Norma ASTM 7264-15: En las fotografías 3 y 4 se muestran una superficie típica de falla a flexión típica de tres puntos, en donde se ilustra la diferencia entre los lados de compresión y tensión de la superficie de la falla, las ramificaciones largas que sobresalen en el lado de tensión, las ramificaciones trituradas y arrugadas que se observan en el lado de compresión demuestran este hecho. Nos ayuda en la observación el hecho de que la separación

final de los trozos de la probeta se hizo mediante fragilización con dióxido de carbono en estado sólido.

5.5. ANÁLISIS DISEÑO EXPERIMENTO.

5.5.1. Análisis diseño experimento para tensión:

Tabla 10. Análisis ANOVA para tensión

ANOVA					
Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadros	σ^2	F_c	F_t
Material compuesto	3	1,831	0,610	68.946	4.757
Bloques	2	0,037	0,018		
Error	6	0,053	0,009		
Total	11	1,884			

Tabla 11. Análisis Duncan para Tensión

Duncan							
Material compuesto		Promedios	Diferencia de medidas		Valor Duncan	Duncan Ajustado	Conclusión
Orientación a 0°	C4	1,681	C4-C1	0,995	3,619	0,197	C4>C1
Orientación a 45°	C3	1,335	C4-C2	0,813	3,587	0,195	C4>C2
Sin fibra	C2	0,869	C4-C3	0,346	3,461	0,188	C4>C3
Orientación a 90°	C1	0,687	C3-C1	0,649	3,587	0,195	C3>C1
			C3-C2	0,467	3,461	0,188	C3>C2
			C2-C1	0,182	3,461	0,188	
DESVIACION DEL ERROR [σ]							0,054319 357

Se analiza que el material compuesto con orientación a 0° es mejor que la orientación a 90°, mejor que el material compuesto sin fibra y mejor que la orientación a 45°.

El material compuesto con orientación a 45° es mejor que la orientación a 90° y mejor que el material compuesto sin fibra.

Pero cabe resaltar que la orientación a 90° es mejor que el material compuesto sin fibra.

5.5.2. Análisis diseño experimento para Flexión:

Tabla 12. Análisis ANOVA para Flexión

ANOVA					
Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadros	σ^2	F_c	F_t
Material compuesto	3	0,520	0,173	6,602	4.757
Bloques	2	0,036	0,018		
Error	6	0,157	0,026		
Total	11	0,677			

Tabla 13. Análisis Duncan para Flexión

Duncan							
Material compuesto		Promedios	Diferencia de medidas		Valor Duncan	Duncan Ajustado	Conclusión
Sin fibra	C4	2,266	C4-C1	0,501	3,619	0,338	C4>C1
Orientación a 90°	C3	2,202	C4-C2	0,368	3,587	0,335	C4>C2
Orientación a 0°	C2	1,898	C4-C3	0,064	3,461	0,324	
Orientación a 45°	C1	1,765	C3-C1	0,437	3,587	0,335	C3>C1
			C3-C2	0,304	3,461	0,324	
			C2-C1	0,133	3,461	0,324	
DESVIACIÓN DEL ERROR [σ]							0,09350619

Se analiza que el material compuesto sin fibra es mejor que la orientación a 45° y la orientación a 0°.

La orientación a 90° es mejor que la orientación a 45° y a 0°.

Sin embargo, cabe resaltar que la orientación a 90° es mejor que el material compuesto sin fibra.

6. CONCLUSIONES.

Se caracterizo el comportamiento mecánico de las hojas de bijao de acuerdo con la orientación a 0°, 45° y 90°, donde el análisis de los resultados obtenidos evidencia un material semirrígido debido a su módulo de elasticidad que se evidencia en la Tabla 2. Además, presenta un bajo porcentaje de elongación que lo hace frágil, sin embargo, tiene un alto rendimiento de esfuerzo a la tensión, sin alteración de tratamientos químicos o mecánicos.

Se evaluó la influencia del tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH) sobre el comportamiento mecánico de la fibra de bijao, el cual mostro una variación significativa en su comportamiento mecánico ya que se redujo el esfuerzo de tensión, pero aumento su ductilidad representado en un mayor porcentaje de elongación y una reducción en su fragilidad debido a que el valor del módulo de elasticidad disminuyo. El tratamiento alcalino influyo directamente en la capacidad de la fibra de bijao en adherirse a la cera de abeja.

Se logro obtener el material de cera de abeja de acuerdo con sus condiciones térmicas, que fueron importantes en el manejo y acondicionamiento para lograr caracterizarla por el método de tensión y flexión, donde se evidencia que el comportamiento mecánico del material tanto en el ensayo de tensión como en el de flexión es semi rígido y se comportan como un material dúctil de acuerdo con los valores de su deformación unitaria y el módulo de elasticidad.

Para la obtención del material compuesto que uso el mismo proceso de la cera de abeja, se adiciono la importancia de conocer el tiempo de catalización para agregar

la fibra con éxito. En cuanto a la caracterización del material compuesto a tensión y a flexión bajo la influencia de la fibra: mostro un aumento en el valor del módulo de elasticidad y de esfuerzo a tensión, haciendo que el material aumente su rigidez puesto que se reduce su deformación unitaria, haciéndolo más frágil; Por otro lado el material compuesto ensayado por flexión, mostro que su esfuerzo en promedio se mantiene constante, sin variar su ductilidad y obteniendo un aumento en el módulo de elasticidad y una reducción en la deformación unitaria, aumentando su rigidez. Se concluye que la mejor influencia de fibra sobre la cera de abeja es a 0° para el ensayo de tensión, y para el ensayo de flexión la orientación que mejor aporta propiedades mecánicas es la de 90° .

Mediante el método de la fractografía se analizó que la fractura ocurrida en el material ensayado de acuerdo con la norma ASTM 3039, mostró patrones de ramificaciones transversales a la fibra y separos por hoyuelos de áreas pequeñas, las cuales son características propias de un material dúctil de baja rigidez que falla por desgarre en un ensayo de tensión axial. De igual manera el análisis de la fractura ocurrida en el material ensayado de acuerdo con la norma ASTM 7264, mostro una superficie dividida en dos caras, una de ellas muestra ramificaciones largas que sobre salen junto con hoyuelos que demuestran una falla por desgarre a tensión y para la otra cara estas ramificaciones se observan trituradas donde se muestra un fallo del material por compresión; siendo esto concluyente de un material semirrígido y dúctil.

7. RECOMENDACIONES.

Mejorar el tratamiento de limpieza para la fibra de bijao, ya sea optimizando el tratamiento de NaOH o sustituyéndolo por otro similar.

Atacar químicamente la cera de abeja, para transfórmala en un material termoestable y caracterizar pertinentemente este hecho.

BIBLIOGRAFÍA

ABAD, P, C Paucar, O Restrepo, J Roa, J Rodriguez, A Rivera, and others, *Ciencia y Tecnología de Materiales y Minerales*, 2013, p. 138

ALBUQUERQUE, Elaine Santiago Brilhante, João Marcelo Alvarenga Braga, and Ricardo Cardoso Vieira, 'Morphological Characterisation of Silica Phytoliths in Neotropical Marantaceae Leaves', *Plant Systematics and Evolution*, 299.9 (2013), 1659–70 <<https://doi.org/10.1007/s00606-013-0823-9>>

ANDERSON, Ken B., R. E. Winans, and R. E. Botto, 'The Nature and Fate of Natural Resins in the Geosphere-II. Identification, Classification and Nomenclature of Resinites', *Organic Geochemistry*, 18.6 (1992), 829–41 <[https://doi.org/10.1016/0146-6380\(92\)90051-X](https://doi.org/10.1016/0146-6380(92)90051-X)>

ASTM, 'D 7264 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials', *Astm D7264 / D7264M*, i (2015), 1–11 <<https://doi.org/10.1520/D7264>>

ASTM International, 'ASTM D 3039M - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials', *Annual Book of ASTM Standards*, 15.03 (2000), 1–13 <https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-08>

ASTM D882: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting', *ASTM Standards*, 2012, 12 <<https://doi.org/10.1520/D0882-12.2>>

BAHARIN, A., N. Abdul Fattah, A. Abu Bakar, and Z.M. Ariff, 'Production of Laminated Natural Fibre Board from Banana Tree Wastes', *Procedia Chemistry*, 19.December (2016), 999–1006 <<https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.149>>

BOGDANOV, Stefan, 'Beeswax : History , Uses and Trade', April, 2016

BOGDANOV, Stefan, and Bee Product Science, 'Beeswax: Production, Properties, Composition, Control', April, 2016

CONACYT, 'Tecnologías Y Medio Ambiente', 2009, 75

CORTOLIMA, 'Flora', Car2004, 2004 <https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/pom_totare/diagnostico/APENDICES/K_apendices2101biodiversidad/211111apendice_flora/apendice_2.18_flora.pdf>

Díaz, Santiago, 'Las Hojas de Las Plantas Como Envolturas de Alimentos', 2011, 120

INSHT, 'Hidróxido De Sodio', Fichas Internacionales de Seguridad Química, 2010, 2 <<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/301a400/nspn0360.pdf>>

KULANDER, B R, and Stuart L Dean, 'Observations on Fractography with Laboratory Experiments for Geologists', Geological Society, London, Special Publications, 92.1 (1995), 59–82 <<https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1995.092.01.05>>

LINARES, E.L, Gloria Galeano, Néstor García, and Yisela Figueroa, Fibras Vegetales Utilizadas En Artesanías En Colombia, 2008

LOCAL, Regionales Y Desarrollo, 'Guía de Buenas Prácticas de Producción de Cera de Abejas', 2016

MALEQUE, M A, B F Yousif, and S M Sapuan, 'Mechanical Properties Study of Pseudo-Stem Banana Fiber Reinforced Epoxy Composite', October, 2007

MOHMMED, Ramadan, Hasabo A Mhd Ahmed, Rabaa Hassan, Suliman Mohammed, and Tarig Siddig, 'Mechanical Properties of Banana Fiber Reinforced Polymer Composites', May 2018, 2017

RANGANATHAN, S, 'Fabrication and Mechanical Property Study on Glass / Sisal / Banana Natural Fibres', January, 2018

U.P.B., 'NaOH Hidróxido de Sodio', Hoja de Seguridad Hidróxido de Sodio (NaOH), 1998, 4