

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO POR
FIBRAS DE COCO (MESOCARPIO) EN MATRIZ BIODEGRADABLE

MARLON FELIPE ARCINIEGAS PACHECO
WILMER YECID DELGADO JAIMES

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

2019

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO POR
FIBRAS DE COCO (MESOCARPIO) EN MATRIZ BIODEGRADABLE

MARLON FELIPE ARCINIEGAS PACHECO
WILMER YECID DELGADO JAIMES

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

DIRECTOR
ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS
Ph.D. Ingeniería mecánica

CODIRECTOR
SERGIO ANDRÉS LESMES ALFONSO
MSc. Ingeniería de materiales

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

2019

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por contribuir en nuestro desarrollo cognitivo, social y cultural; la cual, nos brindó muchos espacios que permitieron llevar a cabo nuestra vida universitaria entre estos Residencias Universitarias (RESIDUIS), cuyo espacio es un lugar donde se desarrollan muchas habilidades que contribuyen al crecimiento personal.

A nuestro director PhD. Alberto David Pertuz Comas y codirector MSc. Sergio Andrés Lesmes Alfonso por dirigir este proyecto y aportar sus conocimientos en el área de los materiales que fueron esenciales para el desarrollo y culminación de este proyecto.

Al Laboratorio de química inorgánica de la Universidad Industrial de Santander, por facilitarnos equipos que fueron necesarios para el proceso de este proyecto.

Al laboratorio de microscopía de la Universidad Industrial de Santander - Parque Tecnológico Guatigará, por su atención y colaboración que fue vital en el desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS.....	18
1.1. OBJETIVO GENERAL	18
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. METODOLOGÍA	19
2.1. MATERIALES	19
2.1.1. Fibra de coco.....	19
2.1.2. Acetato de polivinilo (PVA).....	21
2.1.3. Alginato.....	22
2.1.4. Yeso tipo 5 (JADE STONE).	22
2.1.5. Fécula de maíz.....	22
2.2. FABRICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA MATRIZ.....	23
2.2.1. Fabricación de la matriz.....	23
2.2.2. Selección de la matriz.....	23
2.3. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO.....	24
2.3.1. Selección de la composición del material..	25
2.4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	25
2.4.1. Ensayo de tracción...	26
2.4.2. Ensayo de compresión.....	26
2.4.3. Análisis de fractografía.....	26
2.5. DISEÑO DE EXPERIMENTO	27
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	28
3.1. FIBRA DE COCO.....	28
3.2. SELECCIÓN DE LA MATRIZ BIODEGRADABLE	29
3.3. SELECCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL MATERIAL	31
3.4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	32
3.4.1. Ensayo de tracción.....	32
3.4.2. Ensayo de compresión.....	34
3.4.3. Análisis de fractografía.....	35

3.5. COMPARACIÓN DEL MATERIAL OBTENIDO.	37
4. CONCLUSIONES	40
5. RECOMENDACIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Partes del coco	15
Figura 2. Proceso de fabricación.....	25
Figura 3. Esquema del diseño de experimento	27
Figura 4. Esfuerzo último y módulo de elasticidad de cada matriz.....	30
Figura 5. Esfuerzo último y módulo de elasticidad de cada proporción de fibra.	31
Figura 6. Gráfica esfuerzo vs deformación en el ensayo de tracción.....	33
Figura 7. Gráfica de esfuerzo vs deformación en el ensayo de compresión....	34
Figura 8. Modo de falla de las probetas ensayadas	36
Figura 9. Micrografía de la composición fibra/matriz (20/80)	36
Figura 10. Esfuerzo último de cada material.....	39

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Composición química de la fibra de coco.	19
Tabla 2. Parámetros estructurales de la fibra de coco.	19
Tabla 3. Especificaciones del tratamiento alcalino	20
Tabla 4. Especificaciones del PVA	21
Tabla 5. Propiedades físicas del yeso tipo 5	22
Tabla 6. Matrices alternativas.....	23
Tabla 7. Composición porcentual del material.....	24
Tabla 8. Diseño de experimento.....	27
Tabla 9. Porcentaje de humedad.....	29
Tabla 10. Propiedades mecánicas con base en el ensayo a tracción	33
Tabla 11. Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de compresión	35
Tabla 12. Materiales.	38

NOMENCLATURA

PVA: Polyvinyl Acetate (Acetato de polivinilo)

RMSE: Error medio Cuadrático

(K): Coeficiente de resistencia

(m): Exponente de endurecimiento por deformación

(n): Exponente de endurecimiento por deformación

(σ): Tensión o esfuerzo ingenieril.

(σ_v): Esfuerzo real

(σ_y) = ($\sigma_{0.2}$): Límite elástico equivalente (Esfuerzo de fluencia)

($\sigma_{0.01}$): Esfuerzo en el 0.01% de la deformación total

(σ_u): Esfuerzo último

(ϵ): Deformación ingenieril

(ϵ_v): Deformación real

(E_0): Módulo de elasticidad en el 0% de la deformación total

(n_0): Constante de no linealidad

TITULO: CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO POR FIBRAS DE COCO (MESOCARPIO) EN MATRIZ BIODEGRADABLE¹

AUTOR: ARCINIEGAS PACHECO, Marlon Felipe
DELGADO JAIMES, Wilmer Yecid**

PALABRAS CLAVE: fibra de coco, mesocarpio, matriz polimérica, biocompuestos, caracterización mecánica.

RESUMEN

Se desarrolló un material compuesto con fibras de coco en una matriz biodegradable para evaluar sus propiedades mecánicas mediante ensayos de tracción. Se establecieron tres diferentes alternativas para la matriz del material (alginato + PVA, yeso tipo 5 + PVA y fécula de maíz + PVA) utilizando como base en cada una de ellas el Acetato de polivinilo (PVA); el cual, es un aglutinante biodegradable y soluble en agua; cada una de estas alternativas se sometieron a ensayos de tracción para seleccionar la matriz de mayor rigidez.

Las fibras de coco fueron cortadas aleatoriamente en longitudes de 2,5 cm y tratadas con una solución alcalina de Hidróxido de sodio (NaOH) para eliminar impurezas y sustancias oleosas que no permiten una buena adherencia con la matriz; posteriormente se establecieron las composiciones fibra/matriz (0/100), (10/90), (20/80) y (30/70) en porcentaje peso a peso, cada una de estas composiciones 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) y así seleccionar la composición de mayor rigidez.

El material compuesto más rígido corresponde a la composición fibra/matriz (20/80); la cual, presentó una resistencia última a la tracción de 13,834 MPa y un módulo de elasticidad de 924,460 MPa; siendo esta composición la más frágil debido a que su porcentaje de elongación es de 2,271% y posee una baja tenacidad para soportar esfuerzos de impacto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto Pertuz Comas. Codirector: Sergio Andrés Lesmes Alfonso

TITLE: MECHANICAL CHARACTERIZATION OF A MATERIAL COMPOSED BY COCO FIBERS (MESOCARP) IN A BIODEGRADABLE MATRIX²

AUTHORS: ARCINIEGAS PACHECO, Marlon Felipe
DELGADO JAIMES, Wilmer Yecid**

KEYWORDS: coconut fiber, mesocarp, polymer matrix, biocomposites, mechanical characterization.

ABSTRACT

A composite material with coconut fibers was developed in a biodegradable matrix to evaluate its mechanical properties by means of tensile tests. Three different alternatives were established for the material matrix (alginate + PVA, gypsum type 5 + PVA and corn starch + PVA) using polyvinyl acetate (PVA) as the base in each one of them; which is a biodegradable and water-soluble binder; Each of these alternatives was subjected to tensile tests to select the most rigid.

The coconut fibers were cut randomly into lengths of 2.5 cm and treated with an alkaline solution of sodium hydroxide (NaOH) to remove impurities and oily substances that do not allow a good adhesion with the matrix; subsequently the fiber / matrix (0/100), (10/90), (20/80) and (30/70) compositions were established in weight-to-weight percentage, each of these compositions were subjected to tensile tests to evaluate the effect of the fibers in each composition, taking into account the mechanical properties (Ultimate resistance and modulus of elasticity) and thus select the most rigid composition.

The most rigid composite material corresponds to the fiber / matrix composition (20/80); which had an ultimate tensile strength of 13,834 MPa and a modulus of elasticity of 924,460 MPa; this composition being the most fragile because its elongation percentage is 2.271% and it has a low tenacity to withstand impact efforts.

* Bachelor thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto Pertuz Comas. Codirector: Sergio Andrés Lesmes Alfonso

INTRODUCCIÓN

En Colombia más de 10.000 familias de pequeños agricultores cultivan palma de coco en un área promedio de 1,5 a 2 hectáreas, con una cifra aproximada de 16.848 hectáreas de plantaciones a nivel nacional y convirtiendo al país en un productor potencial.³ La industria de cocos deshidratados y la confitería aprovechan cerca del 70% de la fruta que se procesa en el interior del país y, aun así, esta industria solamente aprovecha la pulpa, constituyendo cerca del 20% de la fruta. El resto de la fruta (el bonote, la cáscara y el agua) son desaprovechados y la mayoría de las ocasiones van a parar a los basureros, ríos, esteros y alcantarillas de las ciudades, produciendo problemas medioambientales.⁴

Para evitar el desperdicio del 80% de la fruta de coco se ha investigado a través del tiempo sus propiedades y características, desarrollando nuevas aplicaciones, aportando al crecimiento del mercado con ideas de emprendimiento; beneficiando desde el campesino que cultiva la palma cocotera hasta el consumidor del producto.

El centro de investigación regional del sureste, campo experimental Chetumal en México describe el coco como una fruta tropical que posee una cáscara lisa y cerosa (exocarpio), y que, dependiendo de la variedad, puede ser de color verde, amarillo, rojizo, café-rojizo, o aun hasta un tono marfil. Esta cáscara cubre el mesocarpio, el cual en un fruto maduro constituye una masa fibrosa de donde se obtiene el bonote y dentro de la misma se encuentra una concha muy

³ Revista dinero. Cultivo de coco en Colombia es insuficiente [en línea], 24 de mayo de 2018, [revisado 19 de enero de 2019]. Disponible en: <https://goo.gl/x54Uxj>

⁴ QUINTANA, Cesar. Situación del coco en Colombia. El sector cocotero en Colombia [en línea], 11 de Octubre de 2012, [revisado 19 de Septiembre de 2018]. Disponible en: <http://goo.gl/KFzey3>.

dura (endocarpio) que encierra a la pulpa (endosperma).⁵

Figura 1. Partes del coco



Fuente: Manual para mejorar la calidad del coco fruta

Algunos podrían considerar que el bonote no tiene utilidad, pero en todo el mundo existe una gran demanda de productos de bonote, porque es una fibra duradera resistente a la humedad, a las polillas, a la putrefacción y a los hongos; no genera electricidad estática y es incombustible.⁶ También es un excelente aislante térmico, acústico y que además de estar en variados productos es un recurso natural abundante, renovable, ligero, biodegradable y de bajo costo;⁷ que permite aprovechar sus excelentes propiedades para reforzar materiales compuestos biodegradables que desempeñan un papel importante por su alta resistencia; y por ello, hoy en día se opta por la sustitución de las fibras

⁵ CORTAZAR, Matilde. CARRILLO, Humberto. Manual para mejorar la calidad del coco fruta. 1ª ed. México D.F.: 2009. p. 5.

⁶ DESPERTAD. Del coco al bonote [en línea]. Publicado en 1992. Disponible en: <https://goo.gl/ebqtRT>

⁷ KESAVAN, R. MAHAVIRADHAN, N. SATHISH, P. Coconut Fiber Reinforced Composites: A Review; año 2017.

industriales por las fibras naturales en diferentes áreas de interés.⁸

Teniendo en cuenta el potencial que poseen las fibras de coco dentro del área investigativa de los materiales compuestos, se plantea su uso como refuerzo en la elaboración de un material completamente biodegradable, para estudiar y observar mediante experimentación los cambios positivos o negativos de sus propiedades, y en lo posible idear nuevas aplicaciones en beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

Llevando a cabo la tarea de recopilar información se pueden encontrar diferentes estudios que se han realizado en la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras de coco, en los cuales hacen énfasis sobre la importancia de comprender los efectos del tratamiento de las fibras en la adhesión interfacial fibra/matriz⁹; para mejorar las propiedades mecánicas como en el caso del “poliéster reforzado con fibras de coco”¹⁰ y en el caso del material compuesto de “gluten de trigo endurecido y reforzado con fibras de coco tratadas”¹¹; en cuya investigación mejoraron la rigidez a la flexión en 1,4GPa. Además de estos estudios también se ha investigado sobre las diferentes variaciones que pueden afectar las propiedades de un material reforzado con fibras de coco para obtener compuestos con altos rendimientos y de diferente aplicabilidad.¹² Las fibras de coco se han llevado incluso a

⁸ FAO (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura). Fibras del futuro

⁹ D.VERMA, Indian Institute of Technology, B.H.U., Varanasi, India and P.C.GOPE, College of Technology, Pantnagar, India. The use of coir/coconut fibers as reinforcements in composites; año 2013.

¹⁰ MULINARI, D.R. BAPTISTA, C.A.R.P. SOUZA, J. V. C. VOORWALD, H.J.C. Mechanical Properties of Coconut Fibers Reinforced Polyester Composites; año 2011.

¹¹ DIAO, Cheng. DOWDING, Timothy. HEMSRI, Sudsiri. PARNAS, Richard R. Toughened wheat gluten and treated coconut fiber composite; año 2013.

¹² BUZKAN, Tayfun. DÖRGENS, Anna. GRAUPNER, Nina. HUMBURG, Heide.

reforzar compuestos epoxídicos logrando buenos resultados cuando han sido tratadas superficialmente.¹³

De acuerdo con los estudios anteriormente mencionados y motivados por el propósito de aprovechar la fibra de coco como elemento natural, se elabora un material compuesto reforzado con fibras cortas distribuidas aleatoriamente en una matriz polimérica biodegradable estableciendo composiciones de 0%, 10%, 20% y 30% en peso de fibra de coco.

La caracterización mecánica del material se lleva a cabo, realizando ensayos de tracción para cada una de las diferentes composiciones del material, luego se efectúa un análisis de los datos obtenidos calculando las propiedades de cada uno y se selecciona el material con la composición más resistente a los esfuerzos de tracción, posterior a ello, se evalúa la resistencia a la compresión del material, se hace un análisis fractográfico de las probetas ensayadas a tensión; y por último se compara el material obtenido con otros materiales existentes.

KELTERER, Wiebke. LABONTE, David. MÜSIG, Jörg. Functional gradients in the pericarp of the green coconut inspire asymmetric fire-composites with improved impact strength, and preserved flexural and tensile properties; año 2017.

¹³ DURAIBABU, D. SUBRAMANIAN, K. SURESH, S.M. Studies on mechanical, thermal and dynamic mechanical properties of untreated (raw) and treated coconut sheath fiber reinforced epoxy composites; año 2014.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la caracterización mecánica de un material compuesto reforzado con fibras de coco (Bonote) en matriz biodegradable.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar la información correspondiente al estudio de los materiales compuestos.
- Analizar los efectos de la proporción de fibra de coco en las propiedades del material compuesto con ensayos de tracción.
- Determinar las propiedades mecánicas elasto-plásticas y fractográficas del material compuesto que posea las mejores características.
- Realizar una comparación con otros materiales de la literatura.

2. METODOLOGÍA

2.1. MATERIALES

Para llevar a cabo el proyecto se hizo necesario la obtención de los siguientes materiales: fibra de coco, Acetato de Polivinilo, Alginato, Yeso tipo 5, y Fécula de maíz.

2.1.1. Fibra de coco. La fibra de coco usada como refuerzo se obtuvo en el vivero y artesanías el BOSQUE. Posteriormente fue cortada aleatoriamente con longitudes promedio de 2,5cm para lograr una buena distribución de esta misma, en el material compuesto; luego se le realizó un tratamiento alcalino con Hidróxido de sodio (NaOH) para eliminar sustancias oleosas e impurezas (sección 2.1.1.1.).

Tabla 1. Composición química de la fibra de coco.

Componente	%peso/peso
Celulosa	36 – 43
Hemicelulosa	41 – 45
Lignina	0,15 – 0,25
Pectina	3 – 4

Fuente: NIÑO M. Obtención y caracterización físico-mecánica de un material compuesto termoplástico reforzado con fibras de coco troceada; año 2012.

Tabla 2. Parámetros estructurales de la fibra de coco.

Características físicas	Valor
Solubilidad en agua	Bajo
Resistencia a la tensión (MPa)	131-175
Elongación a la ruptura (%)	15-40
Módulo de Young (MPa)	4-6

Fuente: NIÑO M. Obtención y caracterización físico-mecánica de un material compuesto termoplástico reforzado con fibras de coco troceada; año 2012.

2.1.1.1. Tratamiento alcalino¹⁴. Las fibras de coco se sometieron a un tratamiento alcalino para eliminar sustancias oleosas e impurezas, con el fin de tener una mejor adherencia de la fibra con la matriz. Este tratamiento se llevó a cabo con hidróxido de sodio (NaOH) diluido en agua en una proporción de 50gr/litro, durante un tiempo determinado. En la siguiente tabla se presentan las especificaciones del tratamiento realizado.

Tabla 3. Especificaciones del tratamiento alcalino

Tratamiento alcalino		
Hidróxido de sodio	500 gramos	Se disuelve el NaOH en un recipiente con la cantidad de agua especificada
Agua	10 litros	
Fibra de coco	400 gramos	La fibra se sumerge en la solución alcalina durante el tiempo estipulado
Tiempo de inmersión	6 horas	
Enjuague	----- ----- -----	Después de extraer la fibra de la solución alcalina, se enjuaga la fibra para quitar el NaOH presente en ella.
Secado natural	72 horas	Se deja la fibra al ambiente

¹⁴ M.J.M., Ridzuan. M.S., Abdul. M., Afendi. K., Asduwin. S.N., Aqmariah. Y., Dan-mallam. The effects of the alkaline treatment's soaking exposure on the tensile strength of Napier fibre; año 2015.

2.1.1.2. Porcentaje de humedad. El porcentaje de humedad se determinó para las fibras de coco antes y después del tratamiento. Se utilizó una balanza de precisión marca OHAUS con una capacidad máxima de 310 g y con sensibilidad de 0,001 g, y el secado se realizó en un horno universal de convención natural marca Memmert. El proceso para la deshumidificación fue el siguiente:

- ✓ Se tomaron muestras de la fibra (con tratamiento y sin tratamiento).
- ✓ Se pesaron las muestras de fibra
- ✓ Se introdujeron al horno durante tres horas a una temperatura de 115°C.
- ✓ Se volvieron a pesar las muestras y se procedió a calcular el porcentaje de humedad presente en cada una de ellas.

2.1.2. Acetato de polivinilo (PVA). Es un Adhesivo vinílico formulado con una emulsión homopolímera de acetato de polivinilo y plastificado externamente, indicado para el pegado específico de madera.¹⁵ “El poli (alcohol vinílico) (PVA) es reconocido como uno de los pocos polímeros de vinilo solubles en agua que también son susceptibles a la biodegradación definitiva en presencia de microorganismos adecuadamente aclimatados”.¹⁶

Tabla 4. Especificaciones del PVA

ESPECÍFICACIONES	
Viscosidad (cps)	10.000 – 15.000
Solidos (%)	33,0 – 37,0
Ph	4,0 – 5,0
Película	Opaca, semielástica

Fuente: MOMENTIVE. Ficha técnica colpega madera [en línea], septiembre de 2011 [revisado septiembre 17 de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/7oR7NL>

¹⁵ MOMENTIVE. Ficha técnica colpega madera [en línea], Septiembre de 2011 [revisado Septiembre 17 de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/7oR7NL>

¹⁶ CHIELINI, Emo. CORTI, Andrea. D'ANTONE, Salvatore. SOLARO, Roberto. Biodegradation of poly (vinyl alcohol) based materials; año 2002.

2.1.3. Alginato. Alginato Clab: alginato cromático para impresiones dentales de alta precisión y elasticidad, de mezclado fácil y homogéneo (Biomaterial de laboratorio dental).

2.1.4. Yeso tipo 5 (JADE STONE). Yeso piedra de muy alta resistencia a la abrasión que se deja apilar muy bien y fluye fácilmente con la menor vibración, (biomaterial para laboratorio dental).

Tabla 5. Propiedades físicas del yeso tipo 5

Color	Azul – Verde
Proporción Agua/Polvo	22ml/100g
Tiempo de mezcal manual	60 – 90 seg
Tiempo de trabajo	5 - 7 min
Tiempo de fraguado	10 min
Expansión de fraguado	0,18%

Fuente: <https://whipmix.com/products/jade-stone/>

2.1.5. Fécula de maíz¹⁷. La fécula de maíz es un alimento rico en carbohidratos, se presenta en forma de pequeños gránulos, los cuales son relativamente densos e insolubles y sólo se hidratan de manera adecuada en agua muy fría.

¹⁷ QUIMINET. Usos y aplicaciones de la fécula de maíz [en línea], 20 de Diciembre de 2011 [revisado Septiembre 18 de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/nbaLNk>

2.2. FABRICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA MATRIZ

2.2.1. Fabricación de la matriz. Para la fabricación se de la matriz se plantearon tres alternativas con el fin de seleccionar la que presenta mejor comportamiento en el ensayo de tracción. Las matrices alternativas fueron:

- ✓ Acetato de polivinilo + yeso tipo 5.
- ✓ Acetato de polivinilo + fécula de maíz.
- ✓ Acetato de polivinilo + Alginato.

Cada una de las matrices tienen una composición porcentual en peso que permitió una buena homogeneización en la mezcla. En la siguiente tabla se presentan las relaciones porcentuales en peso de cada agregado.

Tabla 6. Matrices alternativas

ALTERNATIVAS		
PVA + Fécula de maíz	PVA	66,67 %P/P
	Fécula de maíz	33,33 %P/P
PVA + Alginato	PVA	96,19 %P/P
	Alginato	3,81 %P/P
PVA + Yeso	PVA	84,21 %P/P
	Yeso	15,79 %P/P

2.2.2. Selección de la matriz. Para la selección de la matriz, se realizaron pruebas de tracción a tres réplicas de cada una de las composiciones anteriormente mencionadas (ver tabla 6), con el objetivo de seleccionar la matriz con mayor módulo de elasticidad. Esta matriz seleccionada fue la que se usó para la elaboración del material compuesto.

2.3. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO

Con la fibra de coco ya cortada y su respectivo tratamiento se procedió a realizar una mezcla con la matriz ya seleccionada, teniendo una respectiva relación porcentual respecto a la composición en peso. Esta relación porcentual se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Composición porcentual del material

FIBRA DE COCO	MATRIZ
0%P/P	100%P/P
10%P/P	90%P/P
20%P/P	80%P/P
30% P/P	70%P/P

La mezcla se realizó de forma manual en un tiempo aproximado de tres a cuatro minutos hasta lograr una mezcla homogénea; este proceso se llevó a cabo para cada una de las composiciones porcentuales establecidas. Posteriormente esta mezcla fue distribuida y prensada manualmente en moldes que se fabricaron de acuerdo con la geometría estándar que recomienda la norma ASTM D3039¹⁸. Luego de tener la mezcla en los moldes se realizó el secado natural de esta misma a una temperatura ambiente $27^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}$ durante 72 horas. Después de este tiempo de secado se procedió a retirar el material de los moldes.

¹⁸ ASTM International. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Base de datos UIS.

Figura 2. Proceso de fabricación



2.3.1. Selección de la composición del material. Para la selección de la composición del material se utilizaron tres réplicas de cada una de las diferentes composiciones del material. Estas se sometieron a un ensayo de tracción con el fin de obtener un criterio de selección; el cual, permitió seleccionar la composición con mejor resistencia, es decir, la que tuvo la máxima resistencia última a la tracción y presentó mayor módulo de elasticidad a comparación de las demás.

2.4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La caracterización mecánica al material compuesto se realizó teniendo en cuenta la composición ya seleccionada; la cual, fue sometida a los siguientes ensayos y análisis:

2.4.1. Ensayo de tracción. Este ensayo mecánico se ejecutó teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la Norma ASTM D3039¹⁹, y se trabajó con una velocidad de ensayo de 5 *mm/min* manteniendo el tiempo estimado que establece la Norma (1 – 10 min). Para el ensayo de tracción se utilizó la máquina universal de ensayos marca MTS modelo Bionix.

2.4.2. Ensayo de compresión. El ensayo de compresión se realizó de acuerdo con la Norma ASTM D695²⁰; la cual, establece una velocidad de ensayo en 1,3±0,3 *mm/min*. Para este se hicieron tres réplicas de la composición ya obtenida por criterio de selección y estas réplicas tenían una geometría cilíndrica con dimensiones parametrizadas por la norma. Para estos ensayos se utilizó la máquina universal de ensayos marca MTS modelo Bionix.

2.4.3. Análisis de fractografía. Para el análisis de fractografía se tomaron muestras del tramo donde ocurrió la fractura de las probetas sometidas al ensayo de tracción; estas se recubrieron en oro con un espesor de 20 μm en un equipo de recubrimiento modelo Quorum 150ES, para obtener una superficie conductora. Luego, las muestras se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de carbón y posteriormente fueron analizadas en el Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA 650 FEG tomando capturas fotográficas con las siguientes especificaciones para la visualización de este tipo de material:

- ✓ Detector para imágenes: Electrones secundarios (SE), everhart thornley detector ETD.
- ✓ Voltaje de aceleración 10KV Y 25KV.
- ✓ Alto vacío

¹⁹ ASTM Internacional. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Base de datos UIS.

²⁰ ASTM International. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Base de datos UIS.

2.5. DISEÑO DE EXPERIMENTO

El diseño de experimento se aplica teniendo en cuenta cuales son las variables de entrada (independientes) y las variables de salida (dependientes) dentro del proceso.

Hipótesis: se comprobará que el material compuesto resultante posee mayor resistencia a la tracción que la matriz seleccionada sin reforzar.

Figura 3. Esquema del diseño de experimento

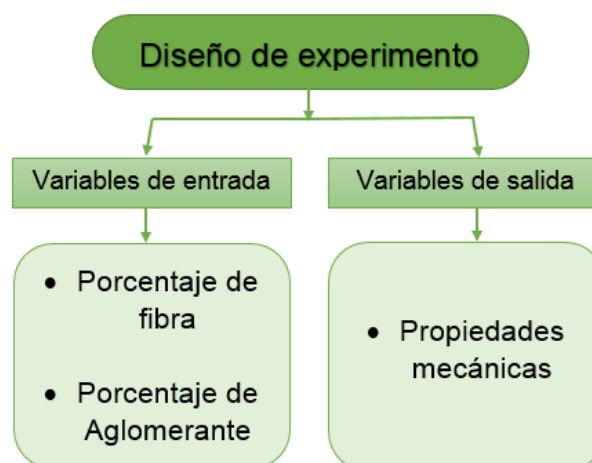


Tabla 8. Diseño de experimento

VARIABLES DEL DISEÑO		
Experimento	Proporción de fibra	Proporción de aglomerante
1	0%P/P	100% P/P
2	10% P/P	90% P/P
3	20% P/P	80% P/P
4	30% P/P	70% P/P

De cada uno de los experimentos de la tabla 3 se elaboraron 3 probetas para la realización de los ensayos de tracción, para un total de 12 experimentos.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados que se obtuvieron durante el proceso metodológico anteriormente planteado junto con el respectivo análisis del mismo durante cada una de las etapas mostrando la información relevante en cada uno de ellos.

3.1. FIBRA DE COCO

Visualmente se observó que la fibra sin tratamiento posee impurezas y sustancias características de ella en su estado natural, dentro de estas se puede encontrar un polvillo característico que se produce en el proceso del desfibrado y que puede interferir con la adherencia del material de la matriz y posiblemente provocaría el desprendimiento de las fibras dentro de esta, causando que la interacción entre los dos materiales sea deficiente y que la fibra no contribuya con el aumento en la resistencia dentro del material compuesto. Por este motivo y por recomendaciones de la literatura de investigación en cuanto a refuerzos en materiales compuestos con fibras naturales, fue necesario aplicar un tratamiento alcalino en las fibras de coco para eliminar todo este tipo de impurezas y garantizar una mejor interacción en la interfase fibra/matriz.

Durante el tratamiento de la fibra se evidenció visualmente un cambio en la coloración de las fibras, partiendo de un marrón claro a un tono más rojizo; además una pequeña cantidad de partículas residuales de la fibra quedaron dentro de la solución alcalina. Posterior al tratamiento se determinó el porcentaje de humedad que adquirieron las fibras para comparar con el que posee la fibra naturalmente. En la tabla 9 se presentan los datos del porcentaje de humedad respectivamente para las muestras de fibra con y sin tratamiento; estos datos fueron calculados a partir del cambio en el peso de las fibras de coco.

Tabla 9. Porcentaje de humedad

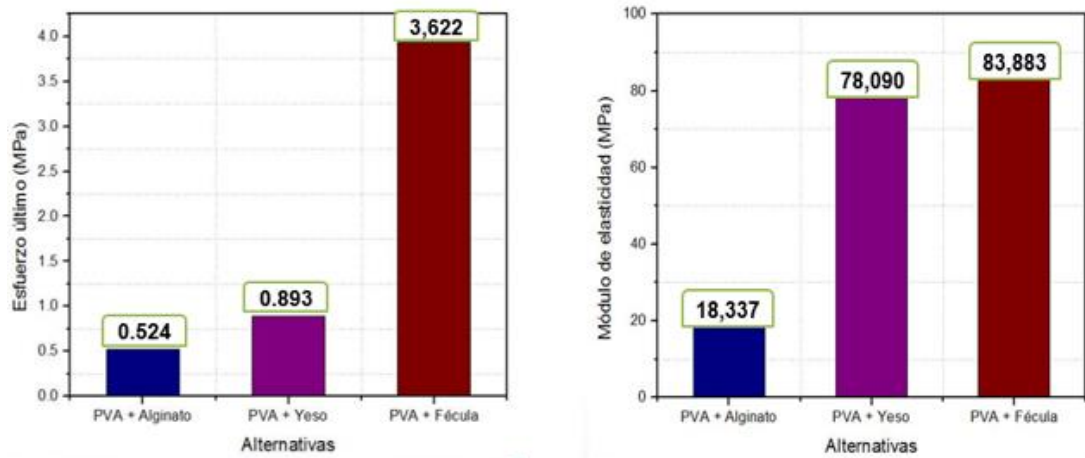
Muestras	Porcentaje de humedad (%)
Fibra sin tratamiento	6,064 ± 0,919
Fibra con tratamiento	7,226 ± 0,172

Del proceso realizado se puede evidenciar un aumento en el porcentaje de humedad del 1,162% en las fibras después del tratamiento. Aunque no es objeto de estudio en este caso particular se podría plantear la hipótesis de que el tratamiento permitió un aumento en la capacidad de absorción de humedad en las fibras.

3.2. SELECCIÓN DE LA MATRIZ BIODEGRADABLE

Para la selección de la matriz se realizaron pruebas de tracción a tres réplicas de cada una de las composiciones (ver tabla 6), donde se observó que la matriz con mejor comportamiento fue la del (PVA + fécula de maíz), ya que esta tuvo como resultado una resistencia última a la tracción de 3,622 MPa, a diferencia de las otras dos matrices (PVA + Alginato) y (PVA+ Yeso tipo 5) con 0,524 MPa y 0,893 MPa respectivamente. Además, las tres alternativas de matriz tienden a comportarse como materiales viscoelásticos debido a que permiten una gran deformación y tiende a recuperar su longitud inicial. A continuación, se muestran los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción de las matrices alternativas.

Figura 4. Esfuerzo último y módulo de elasticidad de cada matriz



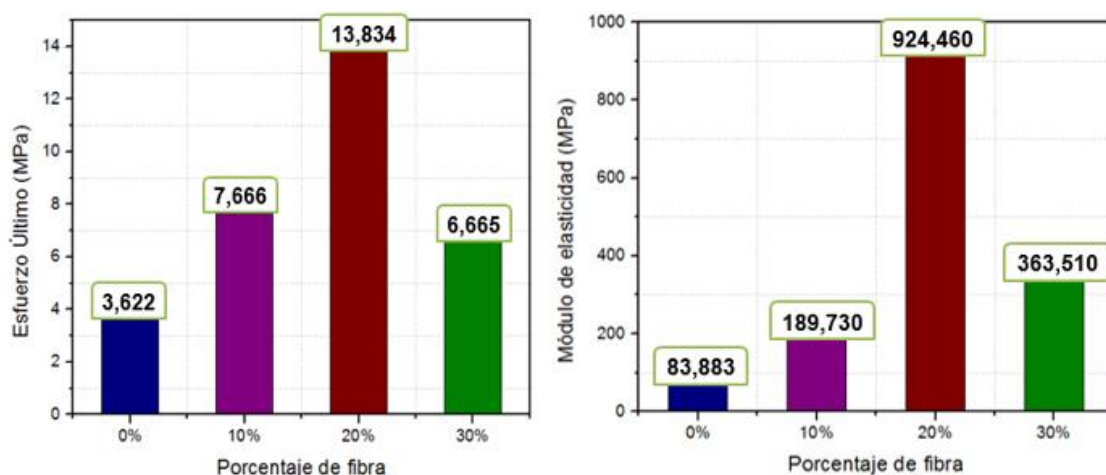
A partir de los resultados obtenidos mediante la desviación estándar de los datos de las 3 réplicas del ensayo de tracción, representados en la figura 4 se evidenció que la matriz de (PVA + Alginato) presenta mayor ductilidad que las otras alternativas con un porcentaje de alargamiento del 67,5%. El (PVA + yeso) y el (PVA + Fécula de maíz), presentaron un módulo de elasticidad más alto y con una pequeña diferencia entre los dos; pero cabe resaltar que el esfuerzo último del (PVA + Fécula de maíz) es aproximadamente cuatro veces más grande que el del (PVA + yeso).

Las alternativas del (PVA + Yeso) y (PVA + Alginato) fueron descartadas porque el (PVA + Fécula de maíz) ofrece mejores propiedades respecto al ensayo de tracción, como lo es el esfuerzo último y su módulo de elasticidad (ver figura 4). Es importante ver que la alternativa del (PVA + fécula de maíz), muestra una mayor resistencia a la tensión, pero posee menor tenacidad dado a que existe mayor fragilidad en el material; esta fragilidad posiblemente se debe a la interacción molecular que experimenta el PVA al ser mezclado con la fécula de maíz.

3.3. SELECCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL MATERIAL

Las diferentes composiciones del material mencionadas en la tabla 7, se sometieron a un ensayo de tracción con el fin de tener un criterio de selección; el cual, permitió seleccionar la composición fibra/matriz (20/80), dado que presentó un mejor comportamiento a los esfuerzos de tracción (ver figura 5). Sin embargo, el esfuerzo y el módulo de elasticidad disminuyen en la composición fibra/matriz (30/70) respecto a los resultados obtenidos con la composición (20/80).

Figura 5. Esfuerzo último y módulo de elasticidad de cada proporción de fibra.



En la figura 5 se observa que la fibra de coco incrementa significativamente la resistencia de la matriz; así mismo, muestra que la composición fibra/matriz (20/80) tiene mayor rigidez respecto a las otras composiciones y su esfuerzo es 3,8 veces el esfuerzo de la matriz. Además al comparar el módulo de elasticidad de cada una de las composiciones en 0%, 10%, 20%, 30%, se determina que el módulo de la composición con 20% de fibra es relativamente más alto a diferencia de las demás proporciones fibra/matriz.

También se puede afirmar que solo con incorporar el 10% de fibra de coco en la matriz del material, se genera un efecto positivo para la resistencia del mismo, esto se debe a que existe una excelente interacción fibra/matriz como se puede

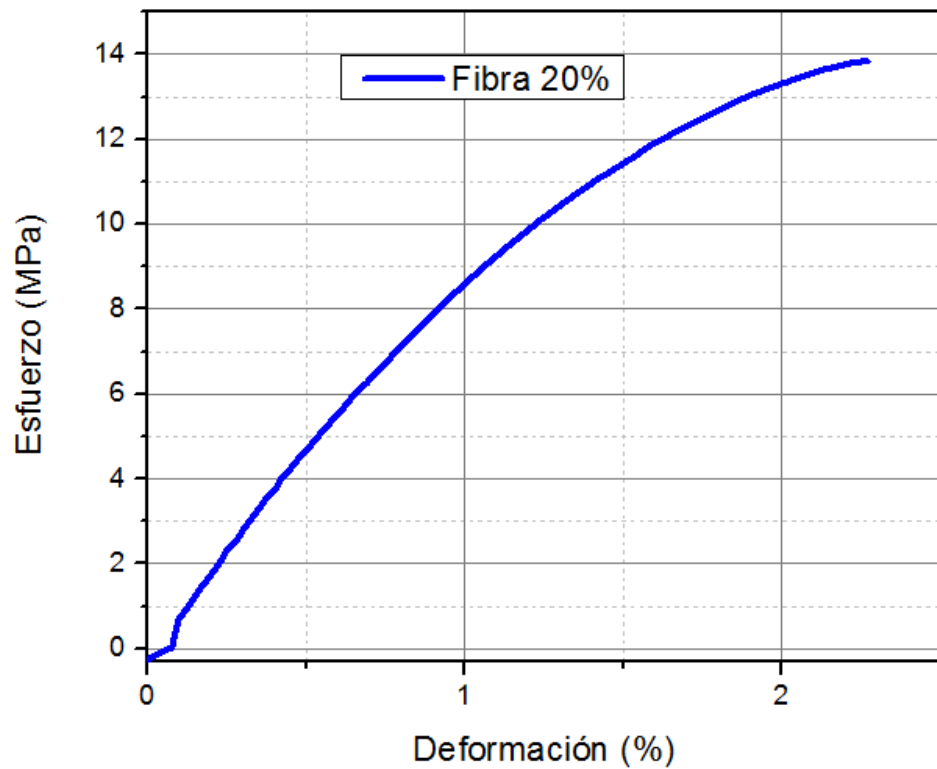
evidenciar en la figura anterior (figura 5), donde solo el 10% de fibra mejoró las propiedades mecánicas. La composición fibra/matriz (20/80) se seleccionó por su resistencia a la tracción y su módulo de elasticidad, pero posiblemente esta composición ofrece mayor resistencia a los esfuerzos de tensión debido a una distribución homogénea de la fibra; lo cual, permite una excelente adherencia de la matriz a la fibra.

3.4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

La caracterización del material compuesto se llevó a cabo para la composición fibra/matriz (20/80) realizando ensayos de tracción y compresión para conocer su resistencia a este tipo de esfuerzos, y de esta manera, establecer la aplicabilidad del material según el análisis hecho sobre los resultados obtenidos.

3.4.1. Ensayo de tracción. En la figura 6, se presentan gráficamente los resultados obtenidos en el ensayo de tracción; en este caso, se representa la curva esfuerzo vs deformación, donde el esfuerzo se estimó como la fuerza axial aplicada, dividida en el área de la sección transversal de la probeta, considerada constante para la curva experimental, y la deformación se representa en porcentaje; determinada por la división del delta de deformación entre la longitud inicial multiplicada por cien.

Figura 6. Gráfica esfuerzo vs deformación en el ensayo de tracción



Se determinaron las propiedades mecánicas del material compuesto de composición fibra/matriz (20/80), teniendo como base los datos experimentales que, se representaron gráficamente en la figura 6. A continuación en la tabla 12 se dan a conocer las propiedades mecánicas cuando el material ha sido sometido a tracción.

Tabla 10. Propiedades mecánicas con base en el ensayo a tracción

Propiedades mecánicas		
Tenacidad	(J/mm^3)	$9,1 \cdot 10^{-5}$
Módulo de resiliencia	$E_r (J/mm^3)$	$2 \cdot 10^{-5}$
Módulo de elasticidad	$E (MPa)$	924,460
Esfuerzo último	$S_{ut} (MPa)$	13,834
Resistencia a la fluencia	$S_y (MPa)$	7,552
Porcentaje de elongación	%EL	2,271
Porcentaje de reducción de área	%Estricción	4,320

Se puede deducir a partir de la tabla 12, que con esta composición fibra/matriz (20/80) del material ganó resistencia a la tracción, pero así mismo, hay una baja capacidad de deformación y una caída en la tenacidad, debido a que el material presenta fragilidad por la cantidad de volumen de fibra que contiene, y la rigidez que también le aporta; esto conlleva a que el material sea apropiado para aplicaciones que no involucren resistencia al impacto (aplicaciones estáticas). No obstante, la resiliencia del material es baja, permitiendo que con poca energía se deforme permanentemente y esto conlleva a que supere rápidamente su límite elástico.

3.4.2. Ensayo de compresión. El ensayo de compresión se llevó a cabo teniendo en cuenta los parámetros que establece la norma ASTM D695; de esta prueba se obtuvieron los siguientes datos experimentales representados gráficamente junto con los modelos representativos de la parte elástica y plástica de la curva esfuerzo- deformación como se muestra a continuación.

Figura 7. Gráfica de esfuerzo vs deformación en el ensayo de compresión.

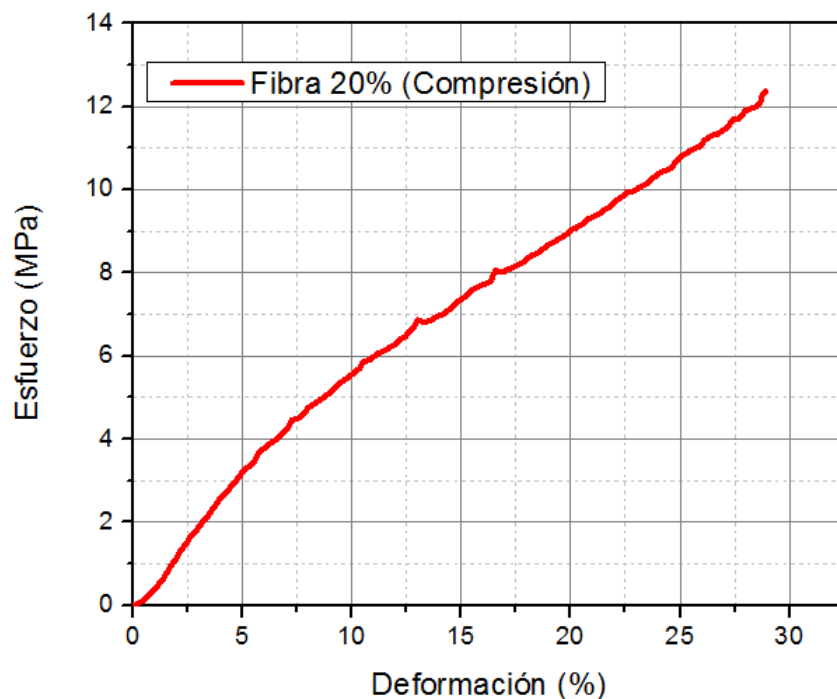


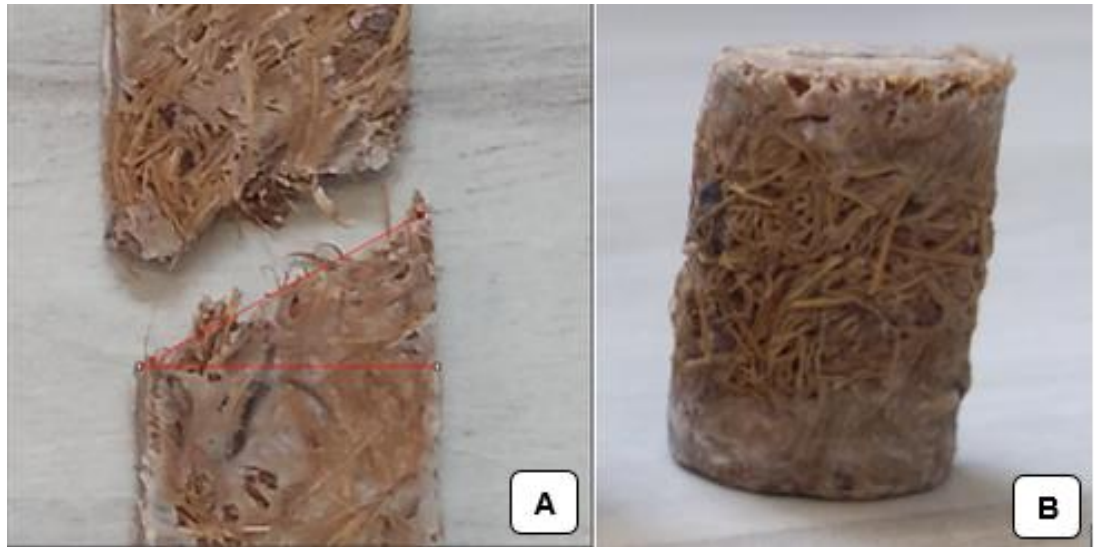
Tabla 11. Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de compresión

Propiedades mecánicas		
Tenacidad	(J/mm^3)	$2,08 \cdot 10^{-3}$
Módulo de resiliencia	$E_r (J/mm^3)$	$5,9 \cdot 10^{-5}$
Módulo de elasticidad	$E (MPa)$	70,013
Esfuerzo último	$S_u (MPa)$	9,033
Resistencia a la fluencia	$S_y (MPa)$	2,847
Porcentaje de acortamiento	%Acortamiento	20,024

A partir de la tabla 15 se puede afirmar que el módulo de elasticidad disminuye, mientras que la tenacidad del material aumenta cuando es sometido a compresión; contrario a lo que sucede cuando el mismo material está sufriendo los efectos de cargas tensionantes. Por otro lado, encontramos que la resiliencia del material ensayado a compresión es aproximadamente 3 veces la resiliencia de este ensayado a tracción, permitiendo una rápida capacidad de recuperación en la zona elástica. También se puede concluir que el material puede sufrir una falla prematura si es sometido a esfuerzos de compresión y se puede destacar la capacidad que posee el material para deformarse 10 veces más cuando se le aplican cargas de compresión.

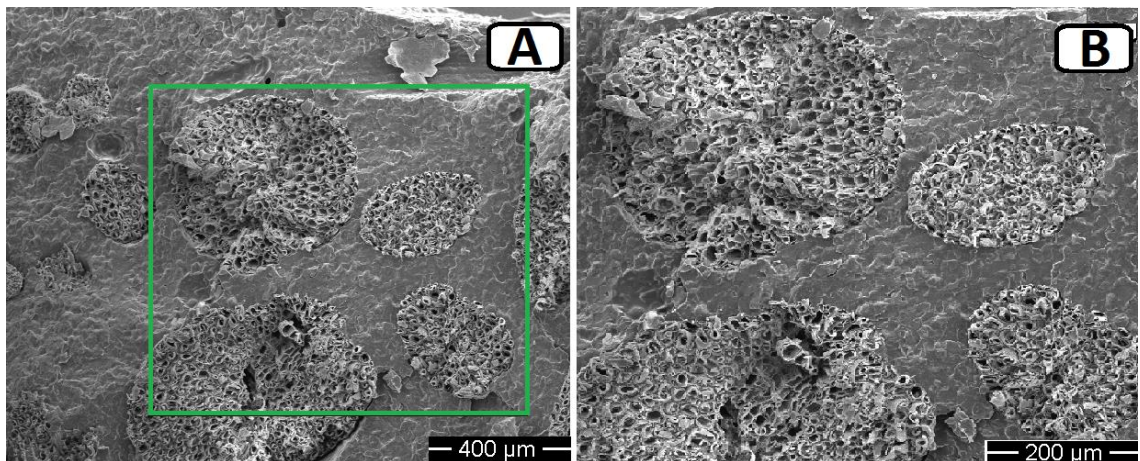
3.4.3. Análisis de fractografía. Las probetas del material compuesto sometido a esfuerzos tensionantes presentaron una fractura frágil, dado que tuvieron una estricción no marcada del 4,32%; ésta es una condición propia de los materiales frágiles. Además, se observó que la propagación de la grieta ocurrió en la zona de prueba de la probeta presentando un ángulo de 28° aproximadamente (ver figura 8A). En el ensayo de compresión se observó que las probetas fallaron por aplastamiento interno de las fibras debido a los esfuerzos cortantes, provocando una pérdida del 20% de su longitud inicial y aumentando su sección transversal significativamente (ver figura 8B).

Figura 8. Modo de falla de las probetas ensayadas



En la figura 9 se muestra la micrografía de la fractura del material con composición fibra/matriz (20/80) apreciando la fracturación interna de las fibras que no se puede observar a simple vista.

Figura 9. Micrografía de la composición fibra/matriz (20/80)



Fuente: Laboratorio de microscopía UIS Guatiguará.

La figura 8B es una ampliación del recuadro de color verde y en ella se puede observar la buena adherencia en la interfase fibra/matriz, lo cual, permite un buen comportamiento del material y que las fibras no deslicen internamente con facilidad. Además, en la figura 10A se puede observar que existe una distribución

fibra/matriz visualmente homogénea, y esta se analizó en el programa ImageJ²¹ (Software de dominio público y código abierto), con el cual, se determinó que la fibra tiene un diámetro de $9,763\ \mu m$ y un área promedio de $74,86\ \mu m^2$; calculando también un número aproximado de 379 poros por cada fibra. Por otro lado, dentro de la micrografía podemos encontrar pequeños defectos generados por burbujas de aire atrapadas en el interior de la matriz que se convierten en concentradores de esfuerzos posibilitando la falla del material en estas secciones.

3.5. COMPARACIÓN DEL MATERIAL OBTENIDO.

El material compuesto que se elaboró con una composición fibra/matriz (20/80) presentó propiedades mecánicas favorables que permiten establecer una aplicabilidad y para esto, se realizó una comparación del material obtenido con otros materiales usados comunmente en la sociedad; entre estos un material compuesto elaborado en una tesis investigativa anterior a ésta. Teniendo en cuenta como criterio de comparación la resistencia última a la tensión de cada uno de los materiales presentados en la tabla 16, se realiza un gráfico comparativo en la figura 10.

²¹ SÁNCHEZ Valenciano, Daniel (2014). Análisis del software ImageJ para el análisis científico de imágenes. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. y Sistemas de Telecomunicación (UPM), Madrid.

Tabla 12. Materiales.

Material 1 ²²	Placa de yeso (DRYWALL)
Material 2 ²³	Tablero de fibras de densidad media (MDF Estándar)
Material 3 ²⁴	Tablero de partículas de madera (MDP)
Material 4 ²⁵	Cáscara de macadamia + PVA
Material 5	PVA + Fécula de maíz + Fibra 20%

A continuación se presenta una gráfica comparativa de los materiales para visualizar la resistencia máxima que posee cada material cuando es sometido a esfuerzos tensionantes:

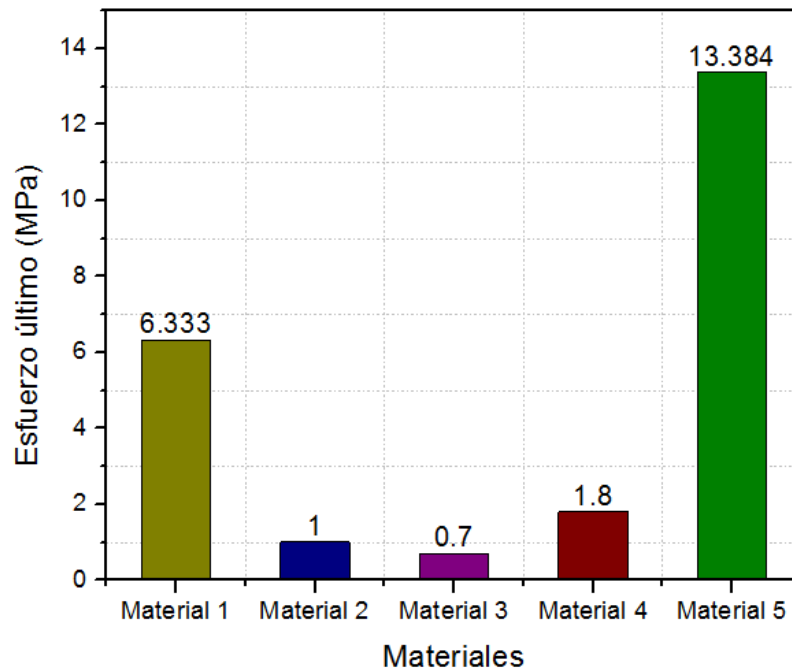
²² GYPLAC. Sistemas Drywall [en línea]. [revisado Noviembre 14 de 2018]. Disponible en: <https://http://goo.gl/WFmhnL>

²³ MASISA. Ficha técnica MDF [en línea]. [revisado Noviembre 14 de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/wDy1CW>

²⁴ ARAUCO, Colombia. Fichas técnicas de productos [en línea]. [revisado Noviembre 14 de 2018] Disponible en: <https://goo.gl/Jd8PjT>

²⁵ CALDERON, Haider. NEYRA, Pablo. caracterización mecánica de un material compuesto apartir de la cascara de la macadamia y un agente aglomerante, acetato de polivinilo (biodegradable).

Figura 10. Esfuerzo último de cada material



Se pudo evidenciar mediante la comparación de los 5 materiales, que el material compuesto por fibra de coco (20/80) presenta una alta resistencia a la tracción respecto a los otros; es decir, que el material compuesto por fibra de coco puede ser utilizado en aplicaciones que se encuentran relacionadas con los materiales 1, 2, 3 y 4 mencionados en la tabla 16 (cielo raso, tableros, paredes divisoras, etc.). Además es importante tener en cuenta que este material no debe estar expuesto al contacto de sustancias líquidas, puesto que la matriz del material es soluble en agua.

El potencial del material elaborado también destaca por el reducido peso, el bajo costo, la durabilidad de las fibras y la biodegradabilidad de sus componentes.

4. CONCLUSIONES

- La matriz (PVA+ Fécula de maíz), presentó el valor más alto para la resistencia última en el ensayo de tracción a comparación de las otras dos matrices, esto se pudo evidenciar en los resultados presentados gráficamente en la figura 4, en la que se observa que la resistencia última del (PVA+ Fécula de maíz) es 4,4 veces la del (PVA+ yeso) y 7,5 veces la del (PVA + Alginato).
- La fibra de coco incrementó la resistencia de la matriz a los esfuerzos de tensión, ya que el esfuerzo último de la composición fibra/matriz (10/90) es aproximadamente dos veces el esfuerzo último de la matriz; Ahora bien, la composición fibra/matriz (20/80) mejoró aún más las propiedades mecánicas relacionadas con el esfuerzo último y el módulo de elasticidad, donde la fibra presentó una contribución del 73,82% y 90,9% respectivamente. Cabe resaltar que la composición del material fibra/matriz (30/70), tiene una decadencia en las propiedades mecánicas.
- El material compuesto con la proporción fibra/matriz (20/80) presentó mejores propiedades mecánicas cuando fue sometido a tensión que a compresión; dado que, el material cuando se comprime falla por aplastamiento, debido a esfuerzos internos de corte, provocando un deslizamiento interno entre las fibras y que el eje axial de la probeta no permanezca alineado con la dirección de aplicación de la carga.
- La composición fibra/matriz (20/80) supera al Drywall con un aumento del 52,68% en el esfuerzo último; pero el material no tiene buena resistencia al impacto porque su tenacidad es baja y posee una baja capacidad de deformación de apenas el 2,27%.
- La presencia de cavidades dentro del material compuesto provocadas por aire atrapado permitió la concentración de los esfuerzos en la zona de ruptura, provocando la falla del material con un ángulo inicial de 45° el cual

fue disminuyendo debido a la desviación que provoca la distribución aleatoria de las fibras.

5. RECOMENDACIONES

- Garantizar una presión de compactación constante y uniforme sobre el material que permita una mejor compresión de las fibras y promueva la eliminación del aire atrapado en el interior del material compuesto.
- El uso de elementos automatizados facilita un mezclado completamente uniforme de la fibra de coco con la matriz.
- Realizar una caracterización térmica y acústica del material permitiría encontrar nuevas aplicaciones para el material.
- Con el propósito de encontrar mejoras en las propiedades del material se recomienda evaluar las composiciones cercanas al 20% p/p de modo que se pueda optimizar el valor de dichas propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

AGROMATICA. Fibras de coco, un sustrato con gran potencial: características de la fibra de coco. [en línea]. Disponible en: <https://goo.gl/pa4xGD>

ARAUCO, Colombia. Fichas técnicas de productos [en línea]. [revisado Noviembre 14 de 2018] Disponible en: <https://goo.gl/Jd8PjT>

ASKELAND, Donald R. WRIGHT, Wendelin J. Ciencia e ingeniería de materiales. 7ª ed. México D.F.: Cengage learning, 2017. p. 617.

ASTM International. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Base de datos UIS.

ASTM International. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Base de datos UIS.

BALVANTIN, Antonio. Ciencia de materiales para ingeniería mecánica: Ensayos y propiedades mecánicas de los materiales. Ago.-dic.2016.

BUZKAN, Tayfun. DÖRGENS, Anna. GRAUPNER, Nina. HUMBURG, Heide. KELTERER, Wiebke. LABONTE, David. MÜSIG, Jörg. Functional gradients in the pericarp of the green coconut inspire asymmetric fire-composites with improved impact strength, and preserved flexural and tensile properties; año 2017.

CALDERON, Haider. NEYRA, Pablo. caracterización mecánica de un material compuesto a partir de la cascara de la macadamia y un agente aglomerante, acetato de polivinilo (biodegradable).

CALLISTER, Jr. William D. Ciencia e ingeniería de los materiales. Barcelona.: Editorial Reverté S.A, 2007. p. 532.

CANNA. El uso de la fibra de coco como concepto de cultivo. [en línea]. Disponible en: [http:// http://www.goo.gl/k4Gc8a](http://http://www.goo.gl/k4Gc8a)

CHIELINI, Emo. CORTI, Andrea. D'ANTONE, Salvatore. SOLARO, Roberto. Biodegradation of poly (vinyl alcohol) based materials; año 2002.

CORTAZAR, Matilde. CARRILLO, Humberto. Manual para mejorar la calidad del coco fruta. 1ª ed. México D.F.: 2009. p. 5.

DESPERTAD. Del coco al bonote [en línea]. Publicado en 1992. Disponible en: <https://goo.gl/ebqtRT>

DIAO, Cheng. DOWDING, Timothy. HEMSRI, Sudsiri. PARNAS, Richard R. Toughened wheat gluten and treated coconut fiber composite; año 2013.

D.VERMA, Indian Institute of Technology, B.H.U., Varanasi, India and P.C.GOPE, College of Technology, Pantnagar, India. The use of coir/coconut fibers as reinforcements in composites; año 2013.

DURAIBABU, D. SUBRAMANIAN, K. SURESH, S.M. Studies on mechanical, thermal and dynamic mechanical properties of untreated (raw) and treated coconut sheath fiber reinforced epoxy composites; año 2014.

FAO. Fibras del futuro – Bonote [en línea]. Disponible en: <http://goo.gl/UnZ4Ru>

GELFUSO, María V. VIEIRA, Pedro. THOMAZINI, Daniel. Polypropylene Matrix Composites Reinforced with Coconut Fibers; junio de 2011.

GONZALES S., Luis O. QUINTERO G., Sandra L. Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto; abril de 2006.

GORDO, Alfredo G. PIRIS, Nuria M. Ciencia de materiales para ingenieros: Materiales compuestos. Madrid.: Editorial Pearson, 2012. p. 460 – 467.

GYPLAC. Sistemas Drywall [en línea]. [revisado Noviembre 14 de 2018]. Disponible en: <https://http://goo.gl/WFmhnL>

HULL, Derek. Materiales compuestos: Clasificación y definición de los materiales compuestos. España.: Editorial Reverté, S.A., 1987. p. 1.

KALAM Anizah, B.B. Sahari, Y.A. Khalid, S.V. Wong. Fatigue behaviour of oil palm fruit bunch fibre/epoxy and carbón fibre/epoxy composites; enero de 2005.

KESAVAN, R. MAHAVIRADHAN, N. SATHISH, P. Coconut Fiber Reinforced Composites: A Review; año 2017.

KLEEMOLA, H. J. NIEMINEN, M. A. On the strain – hardening parameters of metals; Agosto de 1974.

KOTHAPALLY, Raju V.S. SATAPATHY, Sukanya. Mechanical, Dynamic Mechanical and Thermal Properties of Banana Fiber/Recycled High Density Polyethylene Biocomposites Filled with Flyash Cenospheres; 25 de enero de 2017.

LIZANO, Medardo. Guía técnica del cultivo de coco [en línea]. Disponible en: <http://goo.gl/iy5Vra>

LUNA, Gabriela. VELASCO, Reinaldo. VILLADA, Héctor. Fique´s fiber reinforced thermoplastic starch of cassava: preliminary; mayo de 2009.

MAMLOUK, Michael S. ZANIEWSKY, John P. Materiales para ingeniería civil. 2ª ed. Madrid.: Pearson Educación S.A, 2009. p. 468.

MASISA.Ficha técnica MDF [en línea]. [revisado Noviembre 14 de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/wDy1CW>

M.J.M., Ridzuan. M.S., Abdul. M., Afendi. K., Asduwin. S.N., Aqmariah. Y., Dan-mallam. The effects of the alkaline treatment's soaking exposure on the tensile strength of Napier fibre; año 2015.

MOMENTIVE. Ficha técnica colpega madera [en línea], Septiembre de 2011 [revisado Septiembre 17 de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/7oR7NL>

MULINARI, D.R. BAPTISTA, C.A.R.P. SOUZA, J. V. C. VOORWALD, H.J.C. Mechanical Properties of Coconut Fibers Reinforced Polyester Composites; año 2011.

NAVAL COMPOSITE: Materiales compuestos [en línea]. Disponible en: <https://goo.gl/Qrrnw7>

NIÑO M., Diego M. SANCHÉZ C., Diana C. Obtención y caracterización físico-mecánica de un material compuesto termoplástico reforzado con fibras de coco troceada; año 2012.

PARICAGUÁN, Belén M. ALBANO, Carmen L. TORRES, Ronald V. CAMACHO Nelson. INFANTE Jeison. MUÑOZ, José L. Efecto de las fibras de coco sobre la resistencia a la flexión de mezclas de hormigón; año 2005.

PEREZ, Antonio. Enciclopedia virtual de ingeniería mecánica: tracción [en línea]. Disponible en: <http://www.mecapedia.uji.es/traccion.htm>

QUIMINET. Usos y aplicaciones de la fécula de maíz [en línea], 20 de Diciembre de 2011 [revisado Septiembre 18 de 2018]. Disponible en: <https://goo.gl/nbaLNk>

QUINTANA, Cesar. Situación del coco en Colombia. El sector cocotero en Colombia [en línea], 11 de Octubre de 2012, [revisado 19 de Septiembre de 2018]. Disponible en: <http://goo.gl/KFzey3>

SÁNCHEZ Valenciano, Daniel (2014). Análisis del software ImageJ para el análisis científico de imágenes. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. y Sistemas de Telecomunicación (UPM), Madrid.

SHANLEY, F.R. Mecánica de materiales: Torsión. Colombia.: McGraw-Hill, 1971. p. 239.

SIMET. servicios de ingeniería metalúrgica y materiales: fractografía [en línea]. Disponible en: <http://www.simet.cl/fractografia.php>

SMITH, William F. HASHEMI, Javad. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. 5ª ed. México D.F.: McGRAW-HILL, 2014. p. 649.

WESTEEL, Romain. Análisis comparativo de expresiones analíticas para modelizar el comportamiento tenso - deformacional no lineal del acero inoxidable; año 2012.