

0CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO A PARTIR  
DE LA CASCARA DE LA MACADAMIA Y UN AGENTE AGLOMERANTE,  
ACETATO DE POLIVINILO (BIODEGRADABLE).

HAIDER ALDAIR CALDERON ANAYA  
PABLO ANDRES NEIRA HERNANDEZ

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

2018

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO A PARTIR DE  
LA CASCARA DE LA MACADAMIA Y UN AGENTE AGLOMERANTE, ACETATO  
DE POLIVINILO (BIODEGRADABLE)

HAIDER ALDAIR CALDERON ANAYA  
PABLO ANDRES NEIRA HERNANDEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR  
PhD. ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS  
INGENIERO MECÁNICO

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

2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Doctor Alberto David Pertuz por su tiempo y conocimiento dedicado a la dirección de este proyecto, para que el desarrollo y la culminación se llevaran a cabo.

Agradecemos al Laboratorio de Microscopía de la Universidad Industrial de Santander – Parque Tecnológico de Guatigará y su personal, por el servicio de microscopía suministrado para la adquisición de datos.

A la Universidad Industrial de Santander, por cada aporte en todos los ámbitos de nuestra vida, porque no solo fueron en el ámbito académico. Sin lugar a duda después de estos años han transformado nuestra vida

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	14
1. Objetivos .....	20
1.1. OBJETIVO GENERAL: .....	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	20
2. METODOLOGÍA .....	21
2.1. MATERIALES .....	21
2.2. OBTENCIÓN MATERIAL DEL COMPUESTO .....	21
2.3. CARACTERIZACIÓN.....	22
2.3.1. Ensayo de tracción .....	23
2.3.2. Compresión.....	24
2.3.3. Estudio fractográfico .....	24
3. RESULTADOS.....	26
3.1. RESISTENCIA A LA TENSIÓN. ....	26
3.2. ANÁLISIS DISEÑO DE EXPERIMENTO. ....	29
3.3. ENSAYOS DE COMPRESIÓN .....	32
3.4. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO .....	34
4. CONCLUSIONES .....	38
BIBLIOGRAFÍA .....	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dimensiones probeta a tensión según norma ASTM D3039 medidas en milímetros. ....	23
Figura 2. Dimensiones probeta a compresión según norma ASTM D695, medidas en pulgadas. ....	24
Figura 3. Curva esfuerzo-Deformación experimental del ensayo de tracción probeta de 70% de PVA y tamaño de malla N.º 16.....	27
Figura 4. Resultados de los módulos de elasticidad de los ensayos de compresión. ....	27
Figura 5. Modelos comparativos de los modelos de Swift, Hollomon y experimental en el ensayo a tracción a 26 °C. ....	29
Figura 6. Gráfica de interacción de los niveles de cada factor para con el módulo de elasticidad [MPa]. Realizado con el diseño de experimento en el ensayo de tracción. ....	31
Figura 7. Gráfica de interacción de los niveles de cada factor para con el módulo de elasticidad. Realizado con el diseño de experimento en el ensayo de tracción.....	32
Figura 8. Modelos comparativos de los modelos de Swift, Hollomon y experimental en el ensayo de compresión. ....	34

## **Lista de fotografías.**

Fotografía 1. Microscopía de la combinación de 70% PVA y tamaño de malla N°. 16 del ensayo a compresión. ....	35
Fotografía 2. Microscopía de la combinación de 70% PVA y tamaño de malla N°. 16 del ensayo a tensión. ....	35
Fotografía 3. Microscopía de la microestructura de falla presentado en el ensayo de compresión de la mezcla del 70% de PVA .....	36

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composiciones preparadas para el diseño general completo.....	22
Tabla 2. Resultados de los coeficientes de los dos modelos matemáticos de Swift y Hollomon.....	29
Tabla 3. Resultados de los coeficientes de los dos modelos matemáticos de Swift y Hollomon para el ensayo de compresión.....	33

## NOMENCLATURA

**P:** tamaño de la muestra de malla N.º 16 (área  $\leq 1.4 \text{ mm}^2$ )

**M:** tamaño de la muestra de malla N.º 10 (área  $1,4 - 4 \text{ mm}^2$ )

**G:** tamaño de la muestra de malla N.º 4 (área  $4 - 5,5 \text{ mm}^2$ )

**PVA:** Polyvinyl Acetate

**K:** coeficiente de resistencia

**(n):** exponente de endurecimiento

**( $\sigma$ ):** la tensión o esfuerzo.

**( $\epsilon$ ):** deformación ingenieril

**( $\epsilon^\circ$ ):** deformación real

**TITULO:** CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE UN MATERIAL COMPUESTO APARTIR DE LA CASCARA DE LA MACADAMIA Y UN AGENTE AGLOMERANTE, ACETATO DE POLIVINILO (BIODEGRADABLE)<sup>1</sup>

**AUTOR:** CALDERON ANAYA, Haider Aldair  
NEIRA HERNANDEZ, Pablo Andrés\*\*

**PALABRAS CLAVE:** cascara de macadamia, caracterización de materiales, biocompuestos, matriz polimérica.

### RESUMEN

Un material compuesto de bajo costo de acetato de polivinilo (PVA) y fibras naturales renovables fue desarrollado y analizado por sus propiedades mecánicas. El compuesto se fabricó mezclando concentraciones en peso de 90%, 80% y 70% de PVA con partículas de cascara de macadamia de tres diferentes tamaños. Antes de la producción del compuesto, las partículas de cascara de macadamia se trituraron en un molino de martillo para posteriormente ser tamizadas y obtener los diferentes tamaños de grano. Se utilizó un modelo de diseño factorial completo general (dos factores y tres niveles) para evaluar los efectos de las fibras añadidas y el porcentaje de PVA sobre las propiedades mecánicas como el módulo elástico, para posteriormente seleccionar la mezcla con mejores propiedades mecánicas.

El compuesto híbrido obtenido mostro hasta 44 MPa de módulo de elasticidad a la compresión, 32 MPa de módulo elástico a la tensión y una morfología homogénea en la estructura del material. Para optimizar estas propiedades, las cantidades de fibra se ajustaron usando un modelo matemático lineal. El material compuesto obtenido es un material único de bajo costo, amigable con el medio ambiente y tiene un alto potencial para aplicaciones en materiales de ornamentación, debido su buen módulo de elasticidad.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto Pertuz Comas

**TITLE:** MECHANICAL CHARACTERIZATION OF A COMPOSITE MATERIAL MADE OF THE MACADAMIA SHELL AND AN AGGLOMERANT AGENT, POLYVINYL ACETATE (BIODEGRADABLE)<sup>2</sup>.

**AUTHORS:** CALDERON ANAYA, HAIDER ALDAIR  
NEIRA HERNANDEZ, PABLO ANDRÉS\*\*

**KEYWORDS:** macadamia shell, materials characterization, biocomposites, polymer matrix.

### **ABSTRACT**

A low-cost composite material made of polyvinyl acetate (PVA) and renewable natural fibers was developed and analyzed for its mechanical properties. The compound was manufactured by mixing PVA in concentrations of 90%, 80%, 70% with macadamia shell particles of three different sizes. Before the production of the compound, the particles of macadamia shell were crushed in a hammer mill to be subsequently sieved and obtain the different grain sizes. A general complete factorial design model was used to evaluate the effects of the added fibers and the percentage of PVA on the mechanical properties such as the elastic modulus, in order to later select the mixture with better mechanical properties.

The hybrid compound obtained showed up to 44 MPa of elastic modulus under compression, 32 MPa of elastic modulus to tension and a homogeneous morphology in the structure of the material. To optimize these properties, fiber quantities were adjusted using a linear mathematical model. The composite material obtained is a unique material of low cost, respectful with the environment and has a high potential for applications in cushioning materials, ornamentation, due to its proven good elasticity modulus.

---

\* Bachelor Thesis.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto Pertuz Comas

## INTRODUCCIÓN

Recientemente, el uso de materiales amigables con el medio ambiente ha sido uno de los ejes centrales dentro de la ciencia de los materiales. Los nuevos estudios están orientando su enfoque hacia materiales compuestos que sean renovables, reciclables y biodegradables para la naturaleza y que a su vez sean comercialmente viables<sup>1</sup>.

Se ha prestado atención a compuestos que sean sostenibles desde el punto de vista ambiental, tal es el caso de los polímeros de compuestos renovables que tienen variadas aplicaciones en las diferentes áreas de la ciencia<sup>2</sup> y es que el aprovechamiento y el uso de los subproductos de diferentes procesos agroindustriales, pueden ayudar a producir novedosos compuestos, que a diferencia de los materiales sintéticos son productos de bajo costo. Son variadas las aplicaciones en las cuales son empleadas las fibras y partículas naturales, gracias a su carácter ecológico y al bajo costo en fabricación de biocompuestos, muy utilizados en diferentes ramas como lo son la ingeniería, investigadores o cualquier profesional en el área científica<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Lee and Wang, “Biodegradable Polymers / Bamboo Fiber Biocomposite with Bio-Based Coupling Agent”; Lee and Wang, “Con El Agente de Acoplamiento Basado En Bio.”

<sup>2</sup> Avérous, “Cellulose-Based Biocomposites: Comparison of Different Multiphase Systems.”

<sup>3</sup> Dahy, “Biocomposite Materials Based on Annual Natural Fibres and Biopolymers – Design, Fabrication and Customized Applications in Architecture”; Khoshnava et al., “Woven Hybrid Biocomposite: Mechanical Properties of Woven Kenaf Bast Fibre/Oil Palm Empty Fruit Bunches Hybrid Reinforced Poly Hydroxybutyrate Biocomposite as Non-Structural Building Materials.”

La alternativa que ofrecen las fibras naturales es que su consecución es de fácil acceso por su amplia variabilidad y cantidad, lo que los hace un refuerzo alternativo, además como atractivo principal es la mejora evidente en las propiedades mecánicas como resistencia mecánica, su peso ligero y de las ya mencionadas características ecológicas en refuerzos de polímeros.<sup>4</sup>

Un proveedor de materiales lignocelulósicos cercano es la industria agrícola o agroindustria, encargada de producir toda clase de componentes naturales que en su gran mayoría son utilizados para diferentes usos como es el caso de abonos de tipo orgánico, compostajes, biomasas y en el peor de los casos simplemente desechados por la aparente inutilidad de estos productos, que podrían dársele una aplicación diferente para el avance de la ciencia y el bienestar de la humanidad.<sup>5</sup>

Los materiales producidos en la industria agrícola poseen una gran cantidad de material lignocelulósicos como la caña de azúcar, el fique, el maíz, el coco, la palma de lata, bambú, los residuos de madera, entre otros, estos sirven como refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas, que podrían ser complementarias con matrices poliméricas para esos nuevos estudios en post del avance de la ciencia y la tecnología.<sup>6</sup>

---

<sup>4</sup> Elanchezhian et al., “Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Composites.”

<sup>5</sup> Bernui and Rivero, *El Duelo de La Derrota*.

<sup>6</sup> Otto et al., “Mechanical Properties of a Polyurethane Hybrid Composite with Natural Lignocellulosic Fibers”; Wang et al., “Effect of Fiber Volume Fraction on the Thermal and Mechanical Behavior of Polylactide-Based Composites Incorporating Bamboo Fibers”; Mosiewicki, Aranguren, and Borrajo, “Thermal and Mechanical Properties of Woodflour/Tannin Adhesive Composites.”

Estudios actuales de estos materiales muestran diversos ejemplos como es el caso de “las fibras de piña como refuerzo y base resina de poliéster”,<sup>7</sup> en el cual se obtuvieron resultados de módulos de elasticidad cerca a los 1500 MPA donde se muestra una notable mejora de la base de poliéster que solo posee 500 MPa. Otro ejemplo es el de “fibras de piña henequén y polipropileno”<sup>8</sup>, donde se obtuvo un incremento del módulo al aumentar la cantidad de fibras, otro caso es el de “obtención y caracterización de materiales compactados a partir de cáscara de yuca para la fabricación de tableros de partículas”, donde además, a medida que el tamaño de partícula aumenta, la dureza aumenta.<sup>9</sup>

En Colombia sin embargo se pueden trabajar diferentes fuentes de materias primas lignocelulósicas aparte de las antes mencionadas, como lo es la macadamia para interés de este trabajo en específico.<sup>10</sup>

La nuez de macadamia tiene sus orígenes en Australia. En la actualidad se le da muy poco uso a este tipo de materiales, la Cáscara de la nuez de macadamia se utiliza para crear carbón activado y carbón vegetal, este material altamente poroso es el más utilizado en la fabricación de filtros de carbón para el agua y la purificación del aire. En otras ocasiones las cascara son molidas y utilizadas como fertilizantes

---

<sup>7</sup> Castiblanco, “Obtención y Caracterización Mecánica de Material Compuesto Resina Poliéster - Fibra de Piña.”

<sup>8</sup> Balam-Cocom, Duarte-Aranda, and Canché-Escamilla, “Obtención y Caracterización de Materiales Compuestos de Fibras de La ‘Piña’ de Henequén y Polipropileno.”

<sup>9</sup> Moral et al., “MATERIALES DE ULTIMA GENERACION Y MATERIALES EFICIENTES: MATERIALES COMPUESTOS -COMPOSITES.”

<sup>10</sup> Bernui and Rivero, *El Duelo de La Derrota*.

para los mismos cultivos y en otros casos utilizadas como fuentes de combustible para algunos procesos industriales <sup>11</sup>.

El propósito es generar un material con altas propiedades mecánicas en comparación con la madera y otros materiales compuestos.<sup>12</sup>

Para el desarrollo de este material se plantea introducir una base de cascara de macadamia, que posee unas características de alta dureza en su estado natural, este cultivo actualmente se encuentra en vías de desarrollo en las zonas cafeteras del territorio colombiano<sup>13</sup>.

Para la obtención de la mezcla compuesta se establecen las siguientes combinaciones en peso 90%,80% y 70% de PVA, modelos basados en la literatura existente<sup>14</sup>

Las principales propiedades mecánicas que se pueden establecer para la caracterización de un material compuesto se pueden obtener de los ensayos de tracción, compresión, flexión, como lo son el módulo de elasticidad y el porcentaje de deformación, que a su vez dependen de la resistencia máxima a determinado

---

<sup>11</sup> Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Química. et al., *Revista Colombiana de Química.*; Héctor et al., “CONTENIDO DIRECTORIO Revista Mensual Producida y Editada Por Apoyos y Servicios a La.”

<sup>12</sup> Garibay et al., “Análisis Mecánico y Geométrico de La Nuez de Macadamia Previo Al Diseño y Construcción de Una Quebradora.”

<sup>13</sup> REDACCIÓN EL TIEMPO, “ENTRE CAFETALES, GERMINA LA MACADAMIA - Archivo Digital de Noticias de Colombia y El Mundo Desde 1.990 - Eltiempo.Com.”

<sup>14</sup> Humberto Gutiérrez Pulido; Román de la Vara Salazar, *Análisis y Diseño de Experimentos*; Juan, Kirschenbaum, and Crowe, “Materiales y Materias Primas.”

tipo de carga. Otras Propiedades que se pueden obtener a partir de las anteriores y el análisis de la curva esfuerzo vs porcentaje de deformación son la ductilidad y la rigidez. <sup>15</sup>.

Para hallar el módulo de elasticidad se utilizan dos modelos, el establecido por la Norma ASTM D3039<sup>16</sup>. Para el análisis de la zona plástica fue necesario el uso de otros dos modelos empíricos como los son el de Swift y Hollomon <sup>17</sup>

Modelo de Hollomon 
$$\sigma = K\varepsilon^n \tag{1}$$

Modelo de Swift 
$$\sigma = K(\varepsilon + \varepsilon^0)^n \tag{2}$$

Este estudio utiliza un diseño factorial completo general de dos factores y tres niveles para cada factor, variando la cantidad de aglomerante y tamaño de partícula, con el fin de evaluar la interacción e influencia de cada uno de los factores sobre el módulo de elasticidad en los ensayos de tracción, comúnmente utilizado para estudiar y optimizar el efecto de varios factores sobre una o más variables de respuesta<sup>18</sup>. Los datos estadísticos obtenidos son analizados Usando el programa

---

<sup>15</sup> Alfonso et al., “DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y TENACIDAD DE UN MATERIAL COMPUESTO A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR Y ALMIDON DE YUCA, A TRAVÉS DE LOS ENSAYOS DE TENSION Y DE IMPACTO CHARPY”; Moral et al., “MATERIALES DE ULTIMA GENERACION Y MATERIALES EFICIENTES: MATERIALES COMPUESTOS -COMPOSITES.”

<sup>16</sup> ASTM, “Astm D3039/D3039M.”

<sup>17</sup> Alcántara et al., “Evaluación Del Coeficiente de Endurecimiento Del Acero AISI 1045 Deformado Por Rodillo.”

<sup>18</sup> Cossio et al., “Estadística Para Ingenieros y Científicos”; Guyatt et al., “How To Use Minitab: Design of Experiments.”

informático de MINI TAB<sup>19</sup> ®. Los ensayos de compresión se realizan siguiendo la norma ASTM D695<sup>20</sup>.

En el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales, se pueden presentar diferentes comportamientos tanto en la zona elástica como plástica, para el caso particular de la zona elástica existe la posibilidad de que se presente un comportamiento no lineal. El modelo matemático de Ramberg Osgood, se utiliza para describir el comportamiento no lineal entre la tensión y deformación ingenieril. Este método se puede aplicar con buena precisión a materiales lignocelulósicos, en niveles cercanos a la deformación plástica. Es decir, se implementa en la zona elástica del material. esta expresión no tiene buena precisión en las tensiones superiores a las del límite elástico. <sup>21</sup>

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

---

<sup>19</sup> MINI TAB ®, licencia de Ingeniería Industrial- escuela de estudios Industriales y Empresariales Universidad Industrial de Santander.

<sup>20</sup> Specimens, “Compressive Properties of Rigid Plastics 1.”

<sup>21</sup> Especialitat, “Tesina d’especialitat.”

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL:**

Caracterizar mecánicamente un material compuesto a base de la cascara de la macadamia y un agente aglomerante, acetato de polivinilo (biodegradable).

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Determinar la influencia de los diferentes tamaños de partícula triturada en las propiedades mecánicas, de dicho material compuesto.
- Determinar la influencia de la carga porcentual de aglomerante en las propiedades mecánicas de la mezcla compuesta.
- Caracterizar de las propiedades mecánicas y fractográficas de la mezcla que haya resultado mejor de los resultados.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. MATERIALES**

Para el desarrollo del proyecto se adquirió la materia prima (cascara de macadamia), posteriormente se realizó un proceso de limpieza de la cascara con el fin de extraer impurezas procedentes del proceso de industrialización de la nuez de macadamia.

A continuación, se trituro las cascara de macadamia en un molino de martillo marca PULVEX. Las partículas que no lograron fracturarse hasta el tamaño adecuado se trituro en un molino de cuchillas marca Willey Mill y el material fracturado se tamizó en un equipo portable marca Sieve Shaker.

En el proceso de tamizado se utilizaron tres tipos de malla (4, 10, 16) obteniendo partículas para la malla 4 entre 4 y 5.5 [mm]<sup>2</sup>, malla 10 entre 1.4 a 4 [mm]<sup>2</sup> y malla 16 partículas menores o iguales a 1.4 [mm]<sup>2</sup>

Como matriz se empleó una dispersión acuosa de acetato de polivinilo (PVA) medianamente biodegradable.

### **2.2. OBTENCIÓN MATERIAL DEL COMPUESTO**

Con cada uno de los tamaños de grano (malla 4 entre 4 y 5.5 [mm]<sup>2</sup>, malla 10 entre 1.4 a 4 [mm]<sup>2</sup> y malla 16 partículas menores o iguales a 1.4 [mm]<sup>2</sup>) de cascara de macadamia se hizo una mezcla con su respectivo porcentaje de matriz polimérica (PVA) como se ilustra en la tabla 1. Todas estas combinaciones se realizan en base a su composición en peso.

**Tabla 1.** Composiciones preparadas para el diseño general completo

Cascara de macadamia	Aglomerante (PVA)	Tamaño de partícula
10%	90%	4 - 5,5 $mm^2$
10%	90%	1,4 - 4 $mm^2$
10%	90%	$\leq 1.4 mm^2$
20%	80%	4 - 5,5 $mm^2$
20%	80%	1,4 - 4 $mm^2$
20%	80%	$\leq 1.4 mm^2$
30%	70%	4 - 5,5 $mm^2$
30%	70%	1,4 - 4 $mm^2$
30%	70%	$\leq 1.4 mm^2$

El proceso de mezclado se realizó con un mezclado mecánico para cada una de las 9 combinaciones mostradas en la Tabla 1, agitando el aglomerado de forma constante durante 4 minutos hasta obtener una mezcla homogénea y pastosa.

Posteriormente la mezcla se depositó sobre moldes estandarizados con la geometría recomendada por la norma ASTM D3039 de acuerdo con la figura 1. El tiempo de secado de cada una de las mezclas fue de 72 horas.

Las muestras obtenidas se cortaron y pulieron utilizando técnicas convencionales, con el fin de obtener superficies lisas y libres de rebaba.

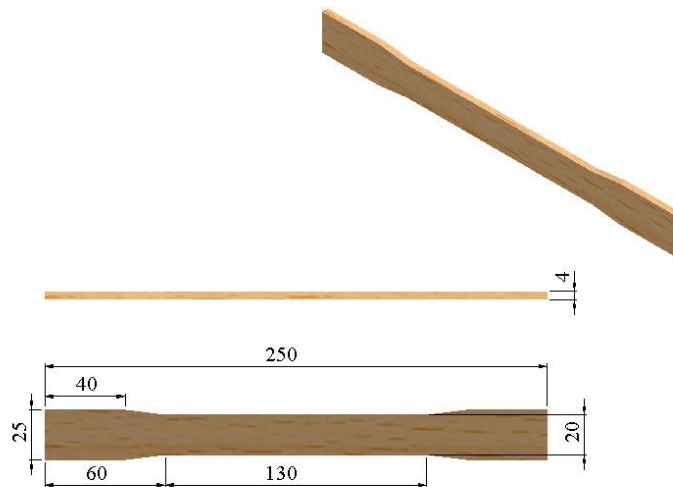
### **2.3. CARACTERIZACIÓN**

Con el fin de estudiar las propiedades mecánicas más relevantes, se realizaron los siguientes ensayos.

2.3.1. Ensayo de tracción: Para realizar los ensayos se utilizó el método establecido por la Norma ASTM D3039 con una velocidad de ensayo de 2 mm/min ajustada de acuerdo con el tiempo de prueba, el cual está entre 1 y 10 minutos, Para cada combinación se realizaron tres replicas para cada combinación de la tabla 1.

Los ensayos se realizaron utilizando una máquina universal de marca MTS modelo Bionix perteneciente a la escuela de Ingeniería mecánica, equipada con una célula de carga de 2 kN, en la cual se establecieron los parámetros de velocidad de deformación, presión de agarre 150 [Psi] y agarre hidráulico con empuñaduras levemente dentadas.

**Figura 1.** Dimensiones probeta a tensión según norma ASTM D3039 medidas en milímetros.

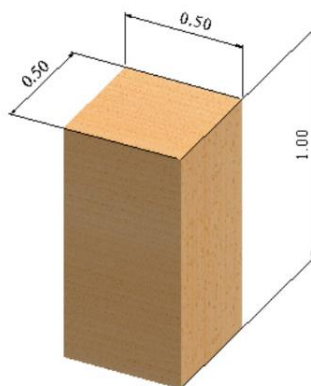


Para la toma de datos se utilizó una frecuencia de 4 datos/s, obteniendo mediciones tanto de Fuerza como desplazamiento del material. A continuación, se muestra la geometría recomendada por la norma ASTM D3039 en la figura 1.

Para cada probeta se midió la sección transversal en tres puntos, y se seleccionó la más baja de las mediciones, además se midió la longitud inicial para determinar el porcentaje de deformación.

2.3.2. Compresión: Para realizar los ensayos de compresión se utilizó el método establecido por la Norma ASTM D695 con una velocidad de ensayo de 1.3 mm/min hasta el límite de tiempo de prueba de 10 min. Para el desarrollo de esta prueba se realizaron 3 réplicas de la combinación con mejor módulo de elasticidad obtenida en el ensayo de tracción. Los ensayos se realizaron en las mismas condiciones del ensayo de tracción.

**Figura 2.** Dimensiones probeta a compresión según norma ASTM D695, medidas en pulgadas.



2.3.3. Estudio fractográfico: Este estudio fue llevado a cabo en el laboratorio de microscopia perteneciente a la sede de la Universidad Industrial de Santander, Parque Tecnológico de Guatiguará de Piedecuesta.

Para el desarrollo de las pruebas, se utilizó el área de fractura de las probetas de tensión y compresión. Las muestras fueron ubicadas de modo que el área de falla quedara paralela al área plana del stub metálico con cinta adhesiva de carbón. Luego fueron recubiertas de oro con un espesor de aproximadamente un

nanómetro, mediante pulverización catódica en un equipo de recubrimiento marca Quorum 150ES para proporcionar una superficie conductora.

Después de realizado el recubrimiento completo, se observó en el microscopio de barrido electrónico (SEM) de marca FEG (Field Emission Gun), bajo condiciones de alto vacío y temperatura ambiente. Las imágenes fueron detectadas y recolectadas en un equipo de electrones secundarios (SE): everhart thornley y el equipo de Electrones retro dispersados (BSE): back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD.

### **3. RESULTADOS**

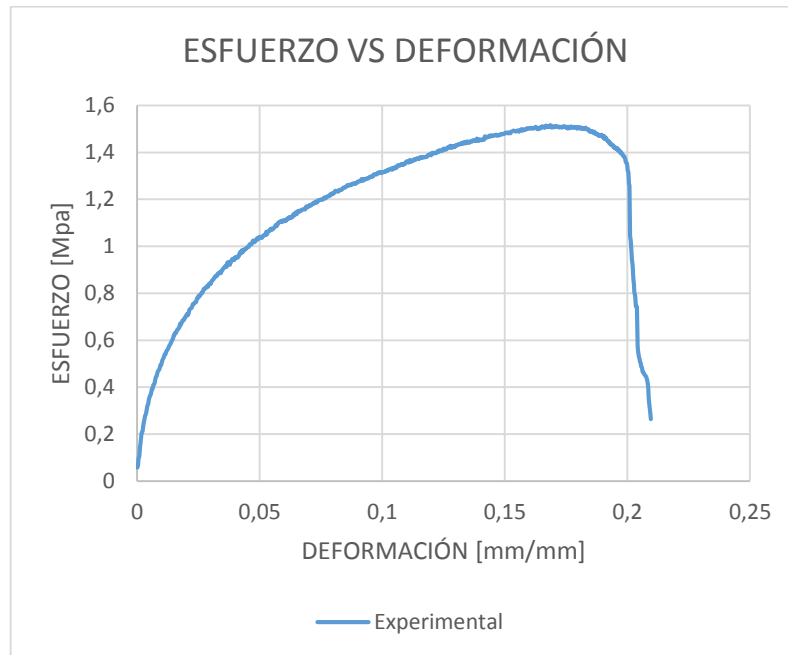
A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la investigación

#### **3.1. RESISTENCIA A LA TENSIÓN.**

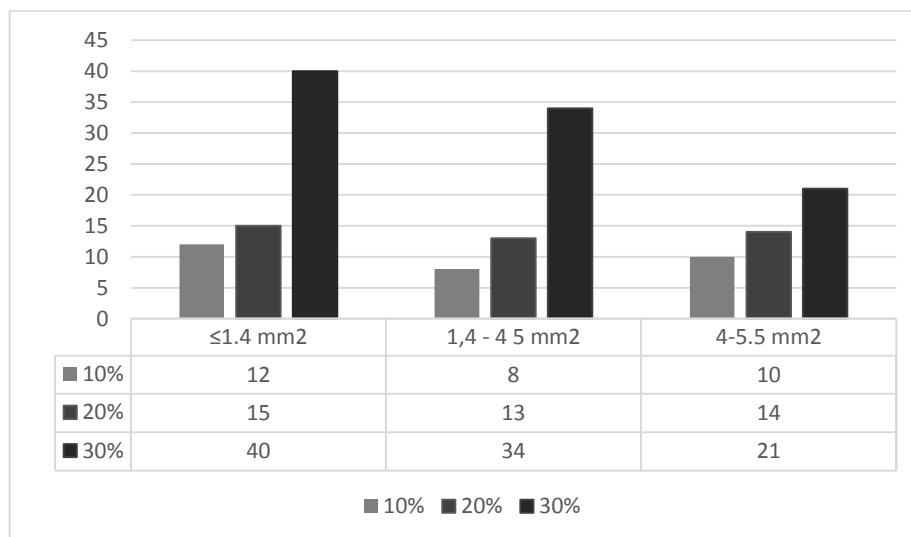
En la Figura 3, se representa en el eje de las abscisas los esfuerzos y las deformaciones en el eje de las ordenadas, los valores de dichos ejes fueron estimados dividiendo la carga aplicada en el área inicial y en las ordenadas la elongación sobre la longitud inicial, además se observó comportamiento no lineal en la zona elástica del material para los ensayos de tracción y compresión, por ende, fue necesario utilizar el método de Ramberg-Osgood para obtener el módulo de elasticidad.

Los resultados obtenidos para cada una de las combinaciones se muestran en la figura 4, donde se evidencia que a menor tamaño partícula de macadamia y cantidad de aglomerante de 70% en peso se obtienen las mejores propiedades mecánicas.

**Figura 3.** Curva esfuerzo-Deformación experimental del ensayo de tracción probeta de 70% de PVA y tamaño de malla N.º 16.



**Figura 4.** Resultados de los módulos de elasticidad de los ensayos de compresión.



Con el fin de establecer un límite en la cantidad de aglomerante, se realizaron pruebas para determinar el módulo de elasticidad de 0% y 40% de cascara de

macadamia, obteniendo como resultado 2 MPa y 25 MPa respectivamente, resultados inferiores a los presentados en la figura 4.

En base a los resultados se obtuvo un incremento hasta de 16 veces el módulo de elasticidad del material, al utilizar refuerzo de cascara de macadamia con respecto a la matriz polimérica, este comportamiento es el esperado ya que la estructura del PVA es amorfa, es decir, con una estructura desordenada a escala atómica debido a que su temperatura de transición vítrea es 28 °C muy cercana a la temperatura ambiente.

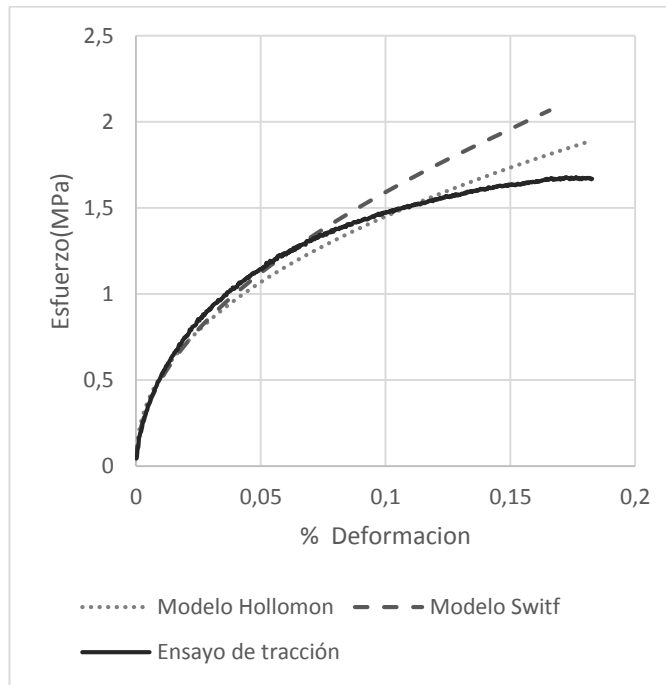
En la figura 5 se describe el análisis de la zona plástica, donde se presentan los resultados obtenidos de los modelos, Hollomon y Swift ajustados de acuerdo con el ensayo de tracción realizado bajo la norma ASTM D3039, cabe resaltar que estos modelos se aplicaron solamente a la mezcla con el mejor módulo de elasticidad logrando un mejor ajuste para el modelo de Hollomon.

Para calcular las constantes  $K$  y  $n$  de los modelos de Hollomon y Swift se hizo mediante un proceso de iteración en el software Engineering Equation Solver (EES)<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> Software con licencia perteneciente a la escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander (UIS)

**Figura 5.** Modelos comparativos de los modelos de Swift, Hollomon y experimental en el ensayo a tracción a 26 °C.



A continuación, se muestra el exponente de endurecimiento ( $n$ ) y coeficiente de resistencia ( $K$ ) por medio de la solución de los modelos matemáticos de Hollomon y Swift, calculados bajo iteración del software (EES).

**Tabla 2.** Resultados de los coeficientes de los dos modelos matemáticos de Swift y Hollomon

Modelo	Coeficiente de resistencia ( $K$ ) [MPa]	Exponente de endurecimiento ( $n$ )
Hollomon	4	0.44
Swift	5	0.25

### 3.2. ANÁLISIS DISEÑO DE EXPERIMENTO.

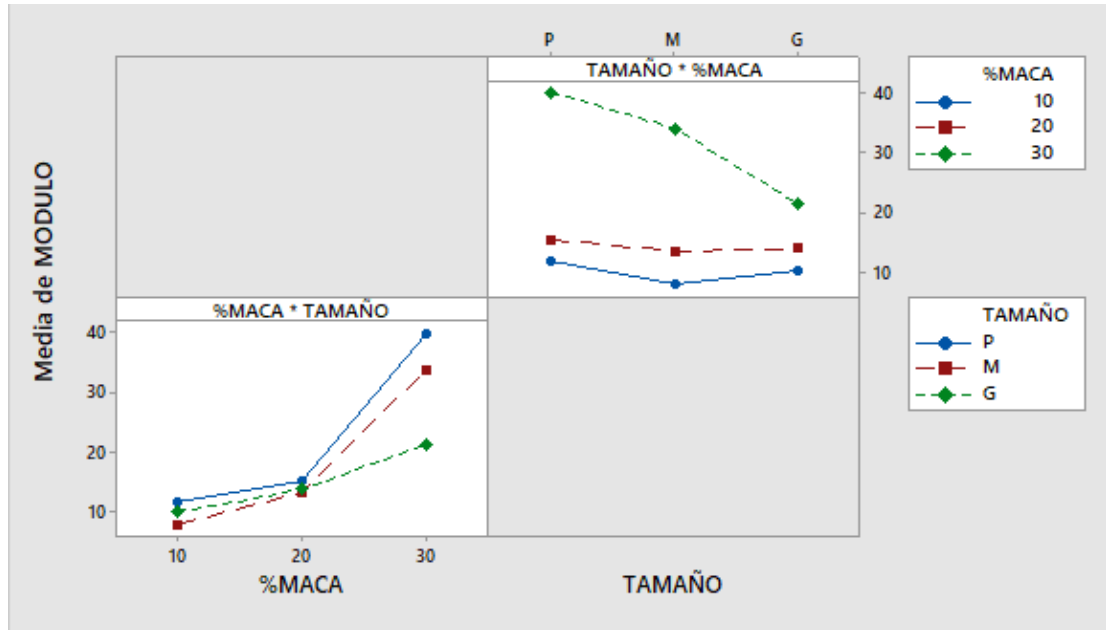
Con el diseño de experimento se obtuvo cual es la combinación que presenta un mayor módulo de elasticidad para posteriormente ser sometido a pruebas tanto de compresión como fractográficas y de esta manera poder caracterizar el material compuesto investigado.

En el análisis del diseño de experimento se evaluó el efecto principal y la interacción existente de los factores que son el porcentaje de PVA y el tamaño de partícula de cascara de macadamia sobre la variable de respuesta (módulo de elasticidad).

Para el análisis de manera gráfica de la interacción (ver figura 6), se ubicó en el eje de las abscisas la variable de respuesta (módulo de elasticidad) y en el eje de las ordenadas cada uno de los factores con sus respectivos niveles (porcentaje de macadamia 10%, 20% y 30% y tamaño P: malla 16, M: malla 10, G: malla 4).

En la figura 6 se evidenció la interacción que existe entre las concentraciones del 30% y tamaño de grano P(malla 16) de cascara de macadamia sobre la variable de respuesta, debido a que las rectas de las gráficas obtenidas tienen una pendiente más sobresaliente respecto a los otros niveles de cada factor, esto indica que al variar el tamaño de grano y la cantidad de aglomerante se presenta cambios en la variable de respuesta, en cuanto a los otros niveles de respuesta presentan líneas de tendencia casi paralelas entre sí, lo que muestra la poca dependencia que presentan y por tanto bajo efecto sobre la variable de respuesta.

**Figura 6.** Gráfica de interacción de los niveles de cada factor para con el módulo de elasticidad [MPa]. Realizado con el diseño de experimento en el ensayo de tracción.



Por otra parte, se analizaron los efectos de los factores de entrada (porcentaje de cascara de macadamia y tamaño de partículas) sobre la variable de respuesta (módulo de elasticidad del material).

Se tuvo en cuenta que cuanto más vertical sea la pendiente de las rectas de las gráficas, el efecto se hace más notable, además cuando se presenta una mayor diferencia entre la media de la respuesta y el promedio de cada nivel el efecto es más notorio y afectará de manera sustancial la variable de respuesta, tal como se observa en la figura 7.

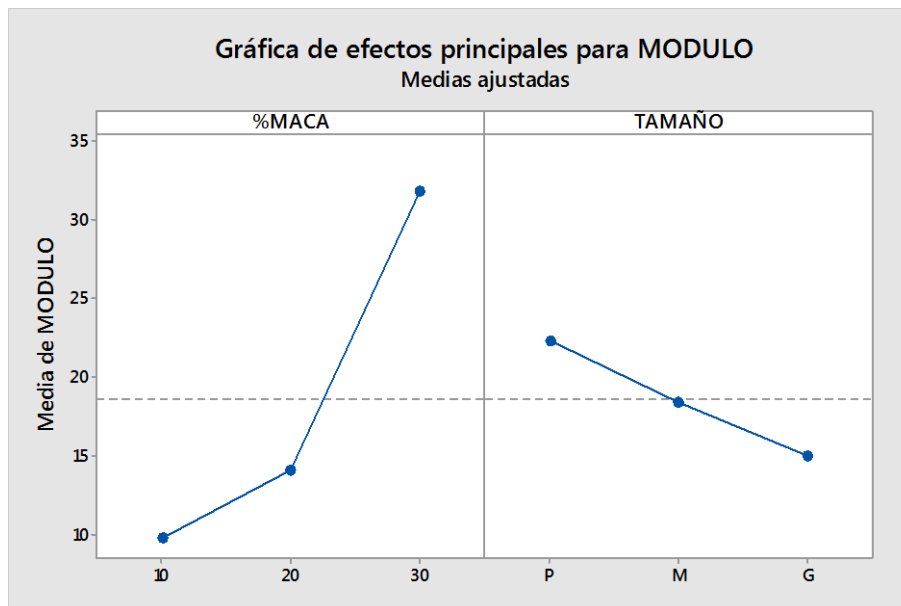
En la figura 7 se evidenció que el efecto más notorio es el porcentaje de cascara de macadamia del 30%. En cuanto al tamaño, el mayor efecto se presentó en el más pequeño de los tres niveles denotado como P (malla 16;  $\leq 1.4 \text{ mm}^2$ ). Por tanto, la

variación del porcentaje de cascara de macadamia afectó en mayor medida la variable de respuesta en comparación con el tamaño de partículas.

La confiabilidad del modelo propuesto se evaluó usando ANOVA. De acuerdo con el análisis de varianza, los modelos lineales se explican con una desviación estándar (S) de  $\pm 2.14$  MPa y un ajuste lineal ( $R^2$ ) de 96.42%. Estos resultados indican que los modelos lineales se pueden usar para estimar los resultados dentro del intervalo de confianza (95% de confianza).

De acuerdo con la optimización del diseño de experimento y de la figura 3 la mejor combinación que se obtuvo fue la de 30 % de macadamia y tamaños inferiores a  $1.4 \text{ mm}^2$ , en base a esta afirmación se procedió a realizar pruebas de compresión.

**Figura 7.** Gráfica de interacción de los niveles de cada factor para con el módulo de elasticidad. Realizado con el diseño de experimento en el ensayo de tracción.



### 3.3. ENSAYOS DE COMPRESIÓN

Para estos ensayos se tomaron probetas de tamaño de grano de  $1,4 \text{ mm}^2$  y porcentaje del 70% de PVA con mejores propiedades según el ensayo de tensión. Para estos ensayos se hicieron tres (3) réplicas de la probeta seleccionada.

El valor del módulo de elasticidad fue calculado bajo el modelo matemático de Ramberg-Osgood. A partir del promedio de las mediciones realizadas durante la prueba de compresión, se halló que el módulo de elasticidad fue de 44 MPa

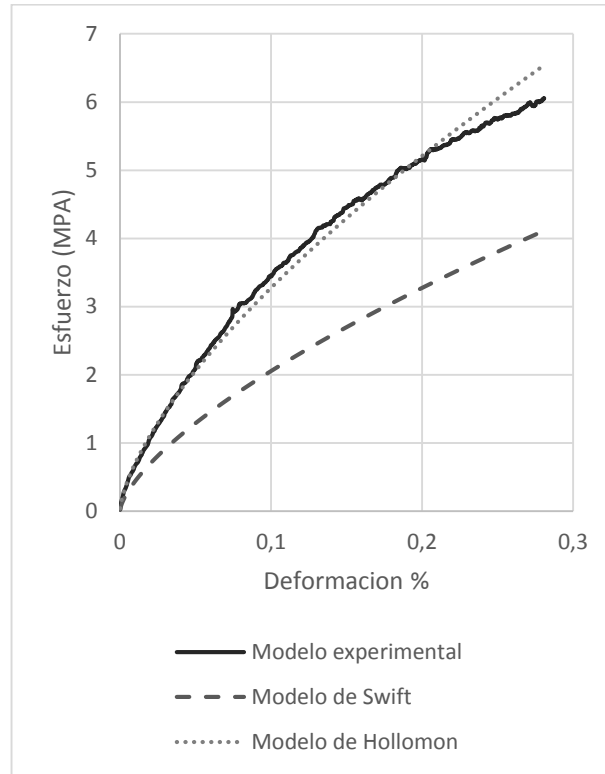
En cuanto el análisis de la zona plástica, los resultados obtenidos por medio de las modelos matemáticas de Hollomon Y Swift fueron los siguientes.

**Tabla 3.** Resultados de los coeficientes de los dos modelos matemáticos de Swift y Hollomon para el ensayo de compresión.

Modelo	Coficiente de resistencia (K) [MPa]	Exponente de endurecimiento ( <i>n</i> )
Hollomon	15.3261	0.6703
Swift	9.6782	0,6729

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 3, se encontró un mejor ajuste para la curva mostrada es el modelo de Hollomon como se indica en la figura 8.

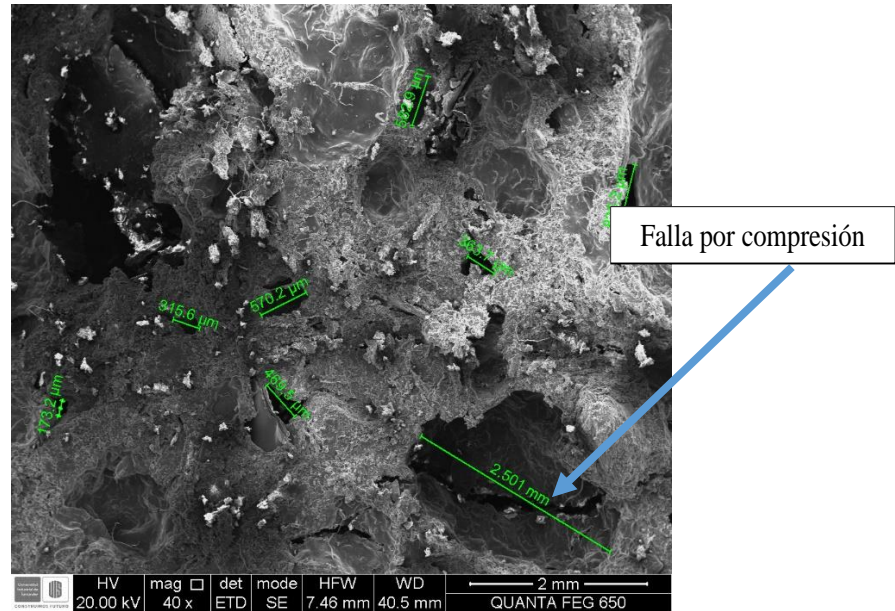
**Figura 8.** Modelos comparativos de los modelos de Swift, Hollomon y experimental en el ensayo de compresión.



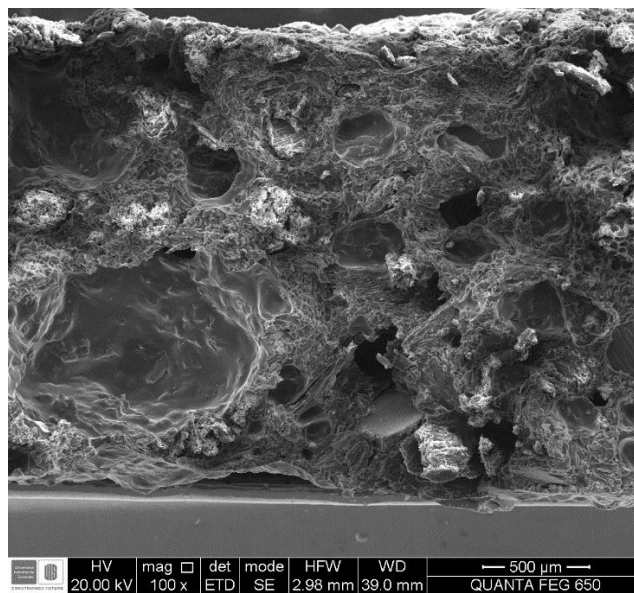
### 3.4. ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

En la fotografía 1 se muestra la morfología de las probetas sometidas a compresión, para el tamaño de partícula de malla N.º 16 (área  $\leq 1.4 \text{ mm}^2$ ), el recubrimiento de oro permitió la visualización de las partículas de macadamia blancas y brillantes distribuidas de manera irregular, sin seguir un patrón evidente, además presentando cavidades porosas apreciables con un diámetro entre  $173 \text{ } [\mu\text{m}]$  y  $2,5 \text{ [mm]}$  en toda su sección. Además, en la fotografía 1 se evidencia un agrietamiento y recorrido de la falla, para lograr detallarla se hizo necesario un acercamiento hasta  $700\times$  tal como se muestra en la fotografía 3.

**Fotografía 1.** Microscopía de la combinación de 70% PVA y tamaño de malla N°. 16 del ensayo a compresión.



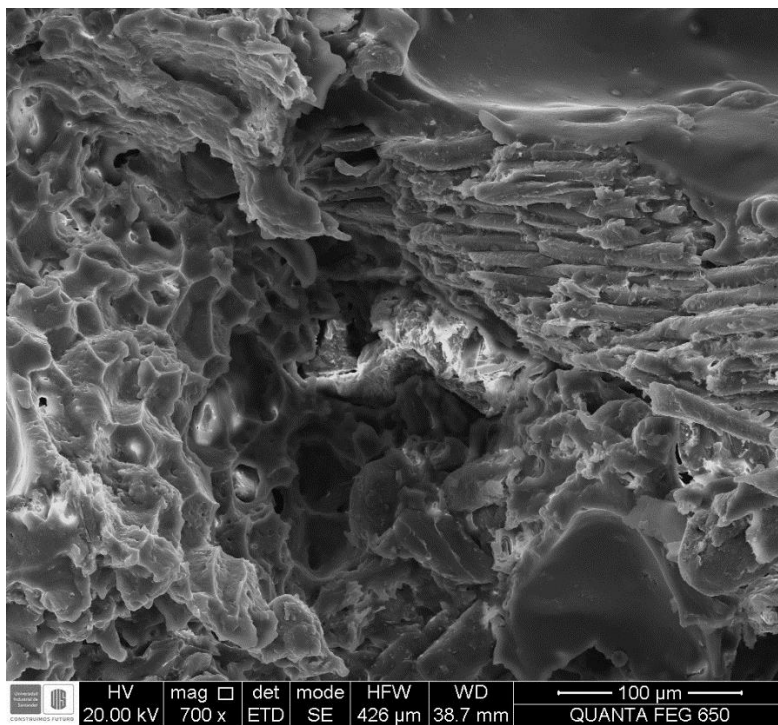
**Fotografía 2.** Microscopía de la combinación de 70% PVA y tamaño de malla N°. 16 del ensayo a tensión.



En la fotografía 2 se observó la morfología obtenida de las probetas sometidas al ensayo de tensión, en ella se visualiza un comportamiento similar en cuanto a distribución irregular y características visuales (partículas blancas y brillantes y evidencia de poros) entre las partículas y la matriz polimérica con relación a la fotografía 1.

Además, se visualizó desprendimiento de las partículas de la cascara de la macadamia, evidenciando fallas en la matriz típicas de un material dúctil.

**Fotografía 3.** Microscopía de la microestructura de falla presentado en el ensayo de compresión de la mezcla del 70% de PVA



En la fotografía 3, se observa el mecanismo de fractura presentado que es de tipo intergranular, debido a que las grietas se propagan a lo largo de la frontera del

grano, ocasionando la ruptura plástica de los ligamentos generados con la matriz polimérica y por ende desprendiendo las partículas duras del material.

De acuerdo con los resultados de tensión y compresión, el material puede ser implementado para sustituir tableros aglomerados de madera, además otras aplicaciones de ebanistería como es el caso de cielo rasos, muebles como también sustituir el MDF y cajas de cartón gracias a su bajo costo y propiedades mecánicas del material compuesto. Pero debido a las propiedades químicas del acetato de polivinilo (PVA), es recomendable el uso en aplicaciones que no estén relacionadas con el contacto de medios acuosos por ser soluble en agua.

Para el desarrollo de posteriores investigaciones sobre este tipo de material compuesto, es recomendable considerar el uso de otro tipo de matriz que ayude al aumento de las propiedades mecánicas del material y que además sea totalmente biodegradable.

#### 4. CONCLUSIONES

- El estudio de la interacción del tamaño de partículas del material refuerzo (cascara de macadamia) en relación con las propiedades mecánicas del aglomerado, muestra la tendencia que la variación del tamaño altera directamente las propiedades mecánicas del material compuesto. El resultado de las pruebas y sus posteriores análisis muestra que los picos más altos de resistencia de todas las probetas se obtuvieron al usar los tamaños de grano más pequeños, más específicamente la malla 16, debido a la mejor adhesión y agrupamiento con la matriz.
- Los resultados de todos los análisis mostraron que el material compuesto a medida que se le aumenta la cantidad de refuerzo, el compuesto presenta mejores propiedades mecánicas tanto a tensión como a compresión con respecto a la del PVA, hasta el punto donde la adhesión es carente entre matriz-refuerzo que fueron las pruebas del 40% de cascara de macadamia. Se estableció que el aglomerado con porcentaje de 30 % presenta mejores propiedades comparado con las muestras de 10% y 20%, al registrar el valor más alto dando como resultado para esfuerzo de tensión 1.8 MPa, a compresión 12.8 MPa y módulo de elasticidad de 32 MPa para tensión y 41 MPa para compresión.
- De acuerdo con el análisis de fractografía se estableció que las combinaciones con mayor cantidad de aglomerante presentan mayor cantidad de poros, generando esfuerzos residuales causantes de las bajas propiedades mecánicas en comparación con las muestras del 30% de cascara de macadamia, a su vez presentan el tipo de falla de un material dúctil, donde las partículas de macadamia se separan del aglomerante mas no se fractura. Con el fin de obtener mejores propiedades mecánicas se recomienda el uso de otro tipo de

aglomerante, el cual presente un comportamiento diferente a la hora de solidificarse y por tanto evite la formación de porosidades.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara, D, I Rodríguez, E Fernández, and Tomás Fernández Columbié. “Evaluación Del Coeficiente de Endurecimiento Del Acero AISI 1045 Deformado Por Rodillo.” *Nexo* 24, no. 02 (2011): 104–11. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5377/nexo.v24i2.658>.
- Alfonso, Jorge, Ayala Correa, Cristian Alejandro, Barbosa Fontecha, Trabajo De, and Grado Bogotá. “DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y TENACIDAD DE UN MATERIAL COMPUESTO A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR Y ALMIDON DE YUCA, A TRAVÉS DE LOS ENSAYOS DE TENSIÓN Y DE IMPACTO CHARPY.” SANTO TOMÁS, 2014. <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2669/ayalajorge2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- ASTM. “Astm D3039/D3039M.” *Annual Book of ASTM Standards*, 2014, 1–13. <https://doi.org/10.1520/D3039>.
- Avérous, L. “Cellulose-Based Biocomposites: Comparison of Different Multiphasic Systems.” *Composite Interfaces* 14, no. 7–9 (January 1, 2007): 787–805. <https://doi.org/10.1163/156855407782106410>.
- Balam-Cocom, R. J., S. Duarte-Aranda, and G. Canché-Escamilla. “Obtención y Caracterización de Materiales Compuestos de Fibras de La ‘Piña’ de Henequén y Polipropileno.” *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 5, no. 1 (2002): 38–44.
- Bernui, Feliciano, and José Rivero. *El Duelo de La Derrota. Revista CIENCIA Y TECNOLOGÍA*. Vol. 12. Ediciones Primera Plana, 2002. <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/1359>.
- Castiblanco, Andrés Mauricio Alvarado. “Obtención y Caracterización Mecánica de Material Compuesto Resina Poliéster - Fibra de Piña.” 2017, 59.
- Cossio, María Laura T, Laura F Giesen, Gabriela Araya, María Luisa S Pérez-Cotapos, RICARDO LÓPEZ VERGARA, Maura Manca, R. A. Tohme, et al.

- “Estadística Para Ingenieros y Científicos.” *Uma Ética Para Quantos? XXXIII*, no. 2 (2012): 81–87. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.
- Dahy, H. “Biocomposite Materials Based on Annual Natural Fibres and Biopolymers – Design, Fabrication and Customized Applications in Architecture.” *Construction and Building Materials* 147 (August 30, 2017): 212–20. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.079>.
- Elanchezhian, C., B.Vijaya Ramnath, G. Ramakrishnan, M. Rajendrakumar, V. Naveenkumar, and M.K. Saravanakumar. “Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Composites.” *Materials Today: Proceedings* 5, no. 1 (January 1, 2018): 1785–90. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.276>.
- Especialitat, Tesina D. “Tesina d’especialitat,” 2012.
- Garibay, Alonso Salazar, Isis Rodríguez Sánchez, Jesús Ernesto, Corona Andrade, and Israel Ibarra Solís. “Análisis Mecánico y Geométrico de La Nuez de Macadamia Previo Al Diseño y Construcción de Una Quebradora,” no. June 2015 (2014): 33–43. [https://www.researchgate.net/publication/279180231\\_Analisis\\_Mecanico\\_y\\_Geometrico\\_de\\_la\\_Nuez\\_de\\_Macadamia\\_Previo\\_al\\_Diseño\\_y\\_Construcción\\_de\\_una\\_Quebradora](https://www.researchgate.net/publication/279180231_Analisis_Mecanico_y_Geometrico_de_la_Nuez_de_Macadamia_Previo_al_Diseño_y_Construcción_de_una_Quebradora).
- Guyatt, Gordon, Maureen Meade, Andrew Oxman, Trisha Greenhalgh, and Jack Sinclair. “How To Use Minitab: Design of Experiments,” 2014, 1–38.
- Héctor, Lic, Fanghanel Hernández, Ing Carlos, Montañez Villafaña, Juventino Olvera, González Colaboradores, J Roberto Sánchez, et al. “CONTENIDO DIRECTORIO Revista Mensual Producida y Editada Por Apoyos y Servicios a La.” Accessed April 28, 2018. <http://www.infoaserca.gob.mx/claridades/revistas/081/ca081.pdf>.
- Humberto Gutiérrez Pulido; Román de la Vara Salazar. *Análisis y Diseño de Experimentos*. Segunda ed., 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Juan, Lic, Manuel Kirschenbaum, and Claudia Crowe. “Materiales y Materias

Primas,” n.d.

- Khoshnava, Seyed Meysam, Raheleh Rostami, Mohammad Ismail, Abdul Razak Rahmat, and Babatunde Ezekiel Ogunbode. “Woven Hybrid Biocomposite: Mechanical Properties of Woven Kenaf Bast Fibre/Oil Palm Empty Fruit Bunches Hybrid Reinforced Poly Hydroxybutyrate Biocomposite as Non-Structural Building Materials.” *Construction and Building Materials* 154 (November 15, 2017): 155–66. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.189>.
- Lee, Seung-hwan, and Siqun Wang. “Biodegradable Polymers / Bamboo Fiber Biocomposite with Bio-Based Coupling Agent” 37 (2006): 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.04.015>.
- . “Con El Agente de Acoplamiento Basado En Bio” 37 (2006): 80–91. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X05002253>.
- Moral, Alberto, Borque Arquitecto, Marar Nogueira, and López Arquitecto. “MATERIALES DE ULTIMA GENERACION Y MATERIALES EFICIENTES: MATERIALES COMPUESTOS -COMPOSITES,” 2007. [https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42359/Introducci%F3n Composites \(Alberto Moral %2B Marar Nogueira\).pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-200637/TAB42359/Introducci%F3n%20Composites%20(Alberto%20Moral%20Marar%20Nogueira).pdf).
- Mosiewicki, M., M. I. Aranguren, and J. Borrajo. “Thermal and Mechanical Properties of Woodflour/Tannin Adhesive Composites.” *Journal of Applied Polymer Science* 91, no. 5 (March 5, 2004): 3074–82. <https://doi.org/10.1002/app.13498>.
- Otto, Guilherme Piovezan, Murilo Pereira Moisés, Gizilene Carvalho, Andrelson Wellington Rinaldi, Juliana Carla Garcia, Eduardo Radovanovic, and Silvia Luciana Fávaro. “Mechanical Properties of a Polyurethane Hybrid Composite with Natural Lignocellulosic Fibers.” *Composites Part B: Engineering* 110 (2017): 459–65. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.035>.
- REDACCIÓN EL TIEMPO. “ENTRE CAFETALES, GERMINA LA MACADAMIA - Archivo Digital de Noticias de Colombia y El Mundo Desde 1.990 -

Eltiempo.Com,” 1996. <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-599933>.

Specimens, Plastics. “Compressive Properties of Rigid Plastics 1.” *Annual Book of ASTM Standards* i (2008): 1–8. <https://doi.org/10.1520/D0695-15.2>.

Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Química., Karen, Karen Peña, Liliana Giraldo, and Juan Carlos Moreno. *Revista Colombiana de Química. Revista Colombiana de Química*. Vol. 41. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Química, 2012. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/39377>.

Wang, Fang, Mengqing Yang, Shujue Zhou, Siyan Ran, and Junqian Zhang. “Effect of Fiber Volume Fraction on the Thermal and Mechanical Behavior of Polylactide-Based Composites Incorporating Bamboo Fibers.” *Journal of Applied Polymer Science* 135, no. 15 (April 15, 2018): 46148. <https://doi.org/10.1002/app.46148>.