

Análisis del desempeño mecánico de un material compuesto, hecho a partir de un polímero biodegradable en base a almidón de yuca, reforzado con fibras orgánicas obtenidas de la hoja de piña.

Juan Sebastian Mantilla Collantes

2180317

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Mecánica.

Director

William Pinto Hernandez

Dsc. Ingeniería mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería mecánica

Programa de ingeniería mecánica

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de investigación en primer lugar a mis padres, cuyo apoyo inquebrantable ha sido fundamental en mi trayectoria académica. Además, su constancia y sacrificio han sido la base sobre la cual he construido mi formación, permitiéndome alcanzar este hito en mi carrera profesional, sumado a esto, la perseverancia y ética de trabajo que me han inculcado han sido instrumentales en la consecución de este proyecto.

Extiendo mi gratitud a la Universidad Industrial de Santander y al cuerpo docente que ha guiado mi formación. La rigurosidad académica, los recursos tecnológicos y el ambiente de investigación proporcionados por la institución han sido cruciales para el desarrollo de este estudio, aparte reconozco la invaluable contribución de mis profesores, cuya experiencia y conocimiento han enriquecido mi comprensión de la materia y han fomentado en mí un pensamiento crítico y analítico, esencial para la realización de esta investigación.

### **Agradecimientos**

Con profunda gratitud, agradezco a mis padres por su inquebrantable apoyo y sacrificio, pilares fundamentales de mi formación.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme una educación de excelencia y los recursos necesarios para esta investigación.

Mi reconocimiento al auxiliar del laboratorio de mecánica, cuya asistencia técnica fue invaluable.

Agradezco a la secretaria de la Escuela de Mecánica por su eficiente gestión administrativa.

Al director de trabajo de grado, por su guía erudita y constante motivación a lo largo de este proceso académico.

Su contribución colectiva ha sido esencial para el éxito de este proyecto.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo general .....	15
1.2 Objetivos específicos .....	15
2. Metodología .....	17
2.1 Materiales .....	17
2.2 Equipos .....	17
2.3 Obtención material compuesto .....	18
2.3.1 Definición composición de la matriz del material compuesto .....	19
2.3.2 Definición método de secado .....	21
2.3.3 Material compuesto final .....	22
2.3.4 Preparación material .....	24
2.4 Caracterización .....	24
3. Resultados y discusión .....	25
3.1 Pruebas preliminares, método de preparación y definición de composición .....	25
3.2 Caracterización mecánica .....	27
4. Conclusiones .....	32
5. Recomendaciones .....	34
Referencias Bibliográficas .....	35
Apéndices .....	38

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Pruebas composición material compuesto.....	20
Tabla 2 Pruebas con diferentes métodos de secado.....	21

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Maquina Universal MTS Bionix</i> .....	17
Figura 2 <i>Maquina MTS Extensometer</i> .....	18
Figura 3 <i>Dimensiones probeta para ensayo de tracción open hole</i> .....	24
Figura 4 <i>Grafica esfuerzo vs deformación de los materiales compuestos sin tela, 1 tela (10%), 2 telas (20%), 3 telas (30%) de volumen en fibra</i> .....	29
Figura 5 <i>Probeta material compuesto con fibra al 30% de volumen open hole</i> .....	30
Figura 6 <i>Probeta material compuesto con fibra al 30% de volumen</i> . ....	30
Figura 7 <i>Probeta material compuesto con 20% en volumen de fibra de hoja de piña open hole</i> . 30	
Figura 8 <i>Probeta material compuesto con 20% en volumen de fibra de hoja de piña estándar</i> .. 30	
Figura 9 <i>Probeta del ensayo de tracción material compuesto</i> . ....	31
Figura 10 <i>Probeta ensayo de tracción open hole material compuesto</i> .....	31
Figura 11 <i>Probeta ensayo de tracción open hole material compuesto con 10% de volumen de fibra de hoja de piña</i> .....	31
Figura 12 <i>Probeta ensayo de tracción estándar material compuesto con 10% de volumen de fibra de hoja de piña</i> .....	32

## Lista de Apéndices

	<b>pág.</b>
Apéndice A Resistencia a la tracción de la fibra de hoja de piña respecto al diámetro.....	38
Apéndice B Fuerza física y mecánica de la fibra de hoja de piña. ....	38
Apéndice C Distribución de los residuos sólidos generados y dispuestos por los establecimientos industriales según dominios de actividades industriales (toneladas) Total Nacional 2020 .....	39
Apéndice D Diámetros de las fibras de PALF y sus densidades promedio correspondientes.....	39
Apéndice E Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la tracción en agujero abierto de laminados compuestos de matriz polimérica. ASTM D5766/D5766M-11(2018).....	39
Apéndice F Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los materiales compuestos de matriz polimérica.....	41

## Glosario

ASTM: La American Society for Testing and Materials es una organización internacional que desarrolla y publica estándares técnicos consensuados para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios.

Extensómetro: Instrumento utilizado para medir la deformación o cambio de longitud de un objeto bajo tensión.

FMCG: Fast Moving Consumer Goods, también conocidos como bienes de consumo rápido, son productos que se venden rápidamente y a un costo relativamente bajo, como alimentos, bebidas, productos de higiene y otros artículos de uso diario.

Hojalata: Lámina de acero recubierta de estaño, utilizada principalmente para fabricar envases y otros productos.

Matriz polimérica: Material de base en un compuesto de matriz polimérica que aglutina y refuerza las fibras, proporcionando forma y durabilidad.

MPa: Megapascal, unidad de medida de presión y resistencia que equivale a un millón de pascales.

Open hole: Técnica de ensayos mecánicos en la que una muestra tiene un agujero central según una norma específica, utilizada para evaluar la resistencia y la deformación alrededor de defectos preexistentes.

PALF: Pineapple Leaf Fiber, fibra obtenida de las hojas de la piña, conocida por su resistencia y uso en materiales compuestos.

$\mu\epsilon$ : Microdeformación, medida de la deformación que es igual a una millonésima parte de una deformación unitaria. Representada por la letra griega 'mu' ( $\mu$ ) y la letra 'epsilon' ( $\epsilon$ ).

## Resumen

**Título:** Análisis del desempeño mecánico de un material compuesto, hecho a partir de un polímero biodegradable en base a almidón de yuca, reforzado con fibras orgánicas obtenidas de la hoja de piña.

**Autor:** Juan Sebastian Mantilla Collantes.

**Palabras clave:** material compuesto, polímero biodegradable, almidón de yuca, fibra de hoja de piña, propiedades mecánicas, ensayos de tracción.

### Descripción:

Este estudio propone analizar el desempeño mecánico de un material compuesto, combinando un polímero biodegradable a base de almidón de yuca con fibras orgánicas extraídas de hojas de piña. El proceso de fabricación de paneles del material compuesto abarca la selección de proporciones adecuadas, un mezclado apropiado, secado del material y moldeo del material, adicionalmente, se elaboraron paneles con tres concentraciones de fibra en volumen: 10%, 20%, y 30%.

Además, para evaluar el material, se emplearán dos métodos principales: ensayos de tracción según la norma ASTM D3039 y ensayos de tracción con agujero abierto conforme a la norma ASTM D5766, ya que estos permitirán determinar propiedades cruciales como resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y deformación del compuesto. Finalmente, los resultados mostraron que los paneles con una concentración de fibra de hoja de piña del 20% en volumen obtuvieron mejores resultados en términos de esfuerzo máximo y deformación, en comparación con los paneles con otras concentraciones. Por otra parte, este estudio pretende contribuir al desarrollo de materiales sostenibles con propiedades mecánicas competitivas para aplicaciones industriales, aprovechando recursos renovables locales. Pues se espera que el material resultante ofrezca una alternativa ecológica viable a los polímeros sintéticos convencionales en la fabricación de empaques y elementos de protección, abordando así la creciente preocupación por el impacto ambiental de los plásticos tradicionales.

\*\*

---

\*\*Trabajo de Grado

Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Programa académico.  
Director: William Pinto Hernandez. Dsc. Ingeniería mecánica

## Abstract

**Title:** Analysis of the mechanical performance of a composite material made from a biodegradable polymer based on cassava starch, reinforced with organic fibers obtained from pineapple leaves.

**Author:** Juan Sebastian Mantilla Collantes.

**Keywords:** composite material, biodegradable polymer, cassava starch, pineapple leaf fiber, mechanical properties, tensile tests.

### Description:

This study proposes to analyze the mechanical performance of a composite material, combining a biodegradable polymer based on cassava starch with organic fibers extracted from pineapple leaves. The panel manufacturing process for the composite material includes selecting appropriate proportions, proper mixing, drying of the material, and molding of the material. Additionally, panels were produced with three fiber volume concentrations: 10%, 20%, and 30%.

Furthermore, to evaluate the material, two main methods will be employed: tensile tests according to ASTM D3039 and open-hole tensile tests in accordance with ASTM D5766, as these will allow for the determination of crucial properties such as tensile strength, modulus of elasticity, and composite deformation.

Finally, the results showed that panels with a 20% fiber concentration of pineapple leaves by volume achieved better results in terms of maximum stress and deformation compared to panels with other concentrations. Moreover, this study aims to contribute to the development of sustainable materials with competitive mechanical properties for industrial applications, utilizing local renewable resources. It is expected that the resulting material will offer a viable ecological alternative to conventional synthetic polymers in the manufacture of packaging and protective elements, thus addressing the growing concern over the environmental impact of traditional plastics.

††

---

†† Degree Work

Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Academic Program. Director: William Pinto Hernandez, Ph.D. in Mechanical Engineering

## Introducción

En la actualidad, la demanda y la necesidad de nuevos materiales que puedan sustituir a los tradicionales están experimentando un crecimiento significativo, lo cual se debe principalmente a la búsqueda de alternativas más económicas y con propiedades superiores. En este escenario, los materiales compuestos se presentan como una solución innovadora y prometedora para la sustitución de los materiales que se utilizan actualmente, ya que estos se caracterizan por su estructura única, que combina un material de carga resistente (refuerzo) con materiales más blandos (matriz). Esta sinergia no solo permite que el refuerzo proporcione resistencia y rigidez, sino que además la matriz mantiene la integridad estructural del conjunto, asegurando así la posición y orientación adecuadas de los componentes. (Pujari, 2010)

Debido a lo anterior, en industrias como la de bienes de consumo rápido (FMCG), las innovaciones en empaques sostenibles se han convertido en una estrategia crucial, no solo para enfrentar desafíos ambientales, sino también para optimizar la eficiencia operativa. En respuesta a la creciente conciencia global sobre sostenibilidad, las empresas del sector están adoptando soluciones de empaque que incorporan materiales reciclables, biodegradables, diseños ligeros y recursos renovables (Ibrahim et al., 2022). Estas iniciativas no solo buscan mitigar los impactos negativos asociados a los métodos tradicionales de empaque, como la generación excesiva de residuos y las emisiones de carbono, sino que también pretenden mejorar la sostenibilidad a largo plazo.

Es importante destacar que la investigación en materiales compuestos trasciende la industria FMCG; por ejemplo, se ha explorado el aprovechamiento de residuos agrícolas, como

las piñas de rechazo del Chocó, para la producción de etanol (Barrera et al., 2020). Asimismo, se ha investigado la aplicación de materiales compuestos ablativos de matriz polimérica en la fabricación de componentes de propulsión aeroespacial (Robayo-Salazar et al., 2020). Por otro lado, en el sector agrícola, el uso de películas de acolchado convencionales basadas en polietileno ha generado preocupación debido a la acumulación de residuos plásticos en los suelos, lo que afecta negativamente la productividad y ecología de estos. (Sander, 2019). Como respuesta a este desafío Sander (2019), planteo la sustitución de estas películas por alternativas biodegradables, diseñadas para ser degradadas por los microorganismos del suelo. Sin embargo, comprender la biodegradación de polímeros en suelos es complejo, ya que depende de las propiedades del polímero, las características del suelo y las condiciones ambientales predominantes. Estos avances evidencian el potencial de los subproductos agrícolas en el desarrollo de materiales innovadores y sostenibles, ampliando el horizonte de aplicaciones para los materiales compuestos en diversos sectores industriales.

Adicionalmente, la industria de materiales compuestos está experimentando un cambio significativo al reemplazar los refuerzos sintéticos tradicionales por fibras naturales, lo que ha permitido que algunas fibras provenientes del yute, cáñamo, sisal, piña y plátano, así como otros subproductos agrícolas, estén ganando terreno en aplicaciones como la automoción y el envasado. Esta transición se debe a las múltiples ventajas que ofrecen las fibras naturales, entre las cuales se destacan su abundancia, biodegradabilidad y renovabilidad. Además, mejoran la productividad agrícola, presentan bajo peso específico y no son tóxicas. También cabe mencionar que estas fibras poseen propiedades de resistencia satisfactorias y resultan menos costosas que las fibras sintéticas; sumado a esto, su baja abrasividad y la posibilidad de modificar sus propiedades mediante tratamientos químicos las hacen aún más atractivas para la industria (Salinas et al., 2017).

En particular, las fibras derivadas de la hoja de piña han demostrado ser una opción atractiva debido a su baja densidad, alta resistencia específica y biodegradabilidad, según Alajmi et al. (2022). Esto se debe a que las fibras de hoja de piña (PALF) poseen notables propiedades mecánicas, destacándose por su alto contenido de celulosa (70-80%) y un ángulo microfibrilar relativamente bajo, características que les confieren una resistencia específica y rigidez comparables, en ciertos aspectos, a las de la fibra de vidrio. Además, su naturaleza hidrofílica y elevado contenido de celulosa las hacen particularmente interesantes para aplicaciones en materiales compuestos (Hadi et al., 2022).

Al mismo tiempo, el almidón de yuca se ha posicionado como una matriz polimérica biodegradable prometedora, destacándose por sus propiedades atractivas para aplicaciones en empaques y protección de productos. (Castro et al. 2022), adicional a lo anterior, la yuca destaca como un cultivo altamente adaptable, capaz de prosperar en condiciones adversas tales como, sequía, baja fertilidad, suelos ácidos y presencia de malezas, debido a esto, la convierte en una alternativa económica valiosa para Colombia, especialmente en zonas marginales. Su cultivo se extiende por diversas regiones del país, incluyendo la Costa Atlántica, los Llanos Orientales, y zonas de altura intermedia como el Valle del Cauca y las áreas cafeteras bajas. (Ruiz Avilés, 2005b)

Considerando la información expuesta anteriormente, el interés en investigar alternativas para el aprovechamiento de dos recursos, como los residuos de la hoja de piña y el almidón de yuca, se vio estimulado, ya que estudios previos demostraron que ambos componentes poseen propiedades mecánicas apropiadas para diversas aplicaciones que en ese momento utilizaban materiales no biodegradables. En consecuencia, se propuso desarrollar un material compuesto que combinara estos componentes, lo cual permitiría optimizar su uso de manera eficiente y sostenible.

Este enfoque, por tanto, no solo abordaba la problemática de la subutilización de estos recursos, sino que también ofrecía una solución innovadora con un potencial impacto ambiental positivo.

En consecuencia, la presente investigación se centra en la elaboración y caracterización de paneles de material compuesto a base de almidón de yuca, reforzados con fibras de hoja de piña, con el objetivo de explorar las posibles aplicaciones de este material mediante el análisis de sus propiedades mecánicas. Además, el estudio aspira a proporcionar información valiosa sobre cómo la composición del material influye en sus propiedades mecánicas, lo cual permitirá su optimización para aplicaciones específicas. En este contexto, se busca desarrollar un material compuesto biodegradable con propiedades mecánicas adecuadas, lo que podría contribuir a reducir la dependencia de polímeros sintéticos y fomentar una economía más circular. Asimismo, la utilización de residuos agrícolas, como las hojas de piña, no solo contribuye a la disminución de desechos, sino que también promueve la sostenibilidad y abre nuevas oportunidades para la industria al crear materiales innovadores a partir de recursos renovables.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Evaluar experimentalmente el comportamiento mecánico de un material compuesto hecho a partir de un polímero biodegradable en base a almidón de yuca, reforzado con fibras orgánicas obtenidas de la hoja de piña, con el fin de contribuir en el desarrollo de estructuras con bajo impacto ambiental y propiedades mecánicas que sean favorables para la fabricación de armazones y/o empaques.

### 1.2 Objetivos específicos

- **Establecer el procedimiento para la producción de paneles de un polímero biodegradable en base a almidón de yuca, reforzado con fibras orgánicas obtenidas de la hoja de piña de un tamaño de 20x15 cm y porcentaje en volumen de fibra del 10%, 20% y 30%.**
- **Determinar las propiedades de tracción del material compuesto hecho de polímero biodegradable en base a almidón de yuca, reforzado con fibras orgánicas obtenidas de la hoja de piña, utilizando la norma ASTM D3039 / D3039M - "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials".**
- **Determinar la resistencia a la tracción del material compuesto hecho de polímero biodegradable en base a almidón de yuca, reforzado con fibras orgánicas obtenidas**

**de la hoja de pñna, simulando una condici3n de agujero abierto, a partir de la norma ASTM D5766/D5766M-11(2018) - "Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates".**

## 2. Metodología

### 2.1 Materiales

**Almidón de yuca.** Se utilizó almidón de yuca modificado, micro pulverizado, marca expadex, referencia 160911, suministrado por la empresa Insupan.

**Glicerina.** Grado comercial proporcionada por Químicos O2.

**Agua destilada.** Proporcionada por Químicos O2.

**Desmoldante**

**Fibra** a base de hoja de piña obtenida de la empresa “Hecho en Lebrija”

### 2.2 Equipos

**Maquina** Bionix Tabletop modelo 370-02 utilizada para los ensayos a tracción, proporcionado por la universidad industrial de Santander.

**Figura 1** *Maquina Universal MTS Bionix*



*Nota.* MTS Laser Extensometer, proporcionado por la universidad industrial de Santander.

**Figura 2** *Maquina MTS Extensometer*



*Nota.* Extensometer encontrado en el laboratorio de ensayos mecánicos de la universidad industrial de Santander.

### 2.3 Obtención material compuesto

### ***2.3.1 Definición composición de la matriz del material compuesto.***

En la fabricación del material compuesto a base de almidón de yuca, se seleccionó el uso de agua y glicerina como plastificantes debido a su capacidad para modificar y mejorar las propiedades mecánicas del almidón. Según la literatura, el almidón de yuca, compuesto principalmente por amilosa y amilopectina, presenta una estructura semicristalina que es inherentemente frágil en su forma natural (Ruiz Avilés, 2005b). Esta fragilidad limita su aplicación en materiales flexibles y duraderos, por lo que se requiere la adición de plastificantes que incrementen la flexibilidad y procesabilidad del almidón.

En este contexto, el uso del agua y la glicerina es importante ya que son plastificantes que interactúan con las cadenas poliméricas del almidón, reduciendo las fuerzas intermoleculares y aumentando la movilidad de dichas cadenas, lo cual permite que el almidón se transforme en un material termoplástico más flexible y maleable. En particular, la glicerina ha demostrado ser eficaz para reducir la rigidez y mejorar la elasticidad del almidón, lo que resulta en un material final con mejores propiedades mecánicas, como mayor resistencia a la deformación y mejor capacidad de absorción de energía.

Además, la elección de estos plastificantes se basó en su compatibilidad con la matriz de almidón de yuca y en los resultados reportados en estudios previos, donde se ha observado que la combinación de agua y glicerina optimiza el balance entre la flexibilidad y la resistencia del material (Ruiz Avilés, 2005b).

Adicionalmente, partiendo de la información obtenida en la literatura sobre la fabricación de biopolímeros a partir de almidón de yuca, se prepararon varias mezclas con distintas composiciones con el propósito de determinar sus características.

En la tabla 1, se presentan los resultados obtenidos para definir la composición a usar en el producto final, además de una breve descripción de la inspección visual llevada a cabo en cada una de estas pruebas, los porcentajes mostrados en la tabla representan la concentración de masa del material indicado. La densidad calculada experimentalmente para este material compuesto es de 1.16714 gr/cm<sup>3</sup>.

Así mismo estos experimentos fueron obtenidos utilizando un molde elaborado en hojalata con dimensiones de 27 x 17 cm, y se manejó para todas las placas un espesor aproximado de 0.42 mm.

**Tabla 1**

*Pruebas composición material compuesto.*

<b>N.º</b>	<b>Almidón</b>	<b>Glicerina</b>	<b>Agua</b>	<b>Inspección Visual</b>
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	
<b>1</b>	10	6	84	Transparente, débil, frágil, se deshace si se aplica fuerza excesiva, no resiste mucha tracción.
<b>2</b>	15	9	76	También presenta una transparencia buena, pero continúa presentando fragilidad.
<b>3</b>	20	12	68	Mayor resistencia a la tracción, pero la textura deja de ser transparente.
<b>4</b>	70	18	12	Presenta mayor cristalización en su consistencia, disminución de la flexibilidad.

N.º	Almidón %	Glicerina %	Agua %	Inspección Visual
5	40	20	40	Mejor resistencia a la tracción y flexibilidad del material, mejor consistencia en el proceso de fabricación.
6	50	20	30	Disminuye resistencia a la tracción, menor flexibilidad, se cristaliza en el proceso de secado.
7	60	20	20	Disminuye resistencia a la tracción, menor flexibilidad, se cristaliza en el proceso de secado.
8	30	20	50	Baja resistencia a la tracción, mayor flexibilidad.

*Nota.* En esta tabla se muestran las diferentes composiciones probadas junto a una descripción visual.

En conclusión, se escogió como composición de trabajo la obtenida en el experimento N°5 de 40A20G40A, debido a que presento mejores características físicas, visualmente en términos de textura, replicabilidad a la hora de elaborar más muestras, resistencia a la tracción probada experimentalmente, mayor flexibilidad.

### 2.3.2 Definición método de secado.

Una vez obtenida la composición a trabajar se probaron diferentes métodos de secado sobre el material compuesto sin tela, para elegir el mejor.

## Tabla 2

*Pruebas con diferentes métodos de secado.*

N.º	Método de secado	Temperatura Cº	Descripción
1	Horno	105	Tiempo de secado largo (14 horas), mejor terminación en el material, no se nota daño en el material, no genera cristalización.
2	Horno	120	Tiempo de secado intermedio (10 horas), el material termina con una textura amarillenta y con estrías, existe posibilidad de cristalización.
3	Aire libre	Temp Ambiente	Tiempo de secado largo (Dos semanas por placa), terminación de mala calidad, material queda débil y no elimina gran cantidad de agua.
4	Nevera	6	Tiempo de secado largo (5 días), el choque térmico cuando el material es sacado de la nevera hace que se quiebre, es demasiado débil llevando a que se rompa con facilidad.

*Nota.* Métodos de secado utilizados.

En términos generales, se decidió que el mejor método para secar el material compuesto final era el de llevarlo al horno a 105 grados centígrados durante 14 horas, debido a la cantidad del producto final obtenido.

### ***2.3.3 Material compuesto final.***

Una vez decidida la composición final del material (40A20G40A), y el método de secado horno a 105 grados centígrados se realiza el procedimiento final de producción del material compuesto.

1. Se mezcla todos los componentes en un recipiente plástico utilizando una batidora eléctrica de mano a velocidad baja hasta lograr una mezcla homogénea.
2. En una estufa se calienta la mezcla hasta aproximadamente 65 C° - 70 C° y se controla la temperatura en ese rango (Ruiz Avilés, 2005b), con ayuda de un termómetro digital.
3. La mezcla se bate manualmente a una velocidad constante hasta conseguir una consistencia viscosa, con características semejante al pegante.
4. Luego de este paso y mientras la mezcla todavía está caliente se homogeniza manualmente hasta lograr una masa compacta y así eliminar cualquier exceso de aire que pueda quedar dentro de la mezcla.
5. Seguidamente con los moldes que fueron recubiertos con papel mantequilla y posteriormente desmoldante, se acomoda la mezcla en el centro del molde y se prensa completamente por ambas caras del molde; este último paso con el objetivo de eliminar completamente cualquier burbuja de aire que quede y darle la forma deseada con un espesor consistente y área transversal en toda su longitud.
6. Se realiza un presecado de 4 horas en el molde prensado a temperatura ambiente.
7. Se lleva al horno durante 4 horas a 105 grados centígrados sin prensa.
8. Luego se retira el molde y se deja con el papel mantequilla en el horno durante 4 horas más.
9. Posteriormente se retira el papel mantequilla y se deja las últimas 2 horas para que se evapore los residuos de agua dentro del horno conservando la misma temperatura.
10. Pasadas las 2 horas se retira del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente.

Este procedimiento se efectúa de la misma manera para las placas que tienen tela, pero con la diferencia de tener cuidado de tensionar la tela mientras la mezcla pasa a través de ésta; para posteriormente prensarlo y darle la forma deseada.

#### ***2.3.4 Preparación material***

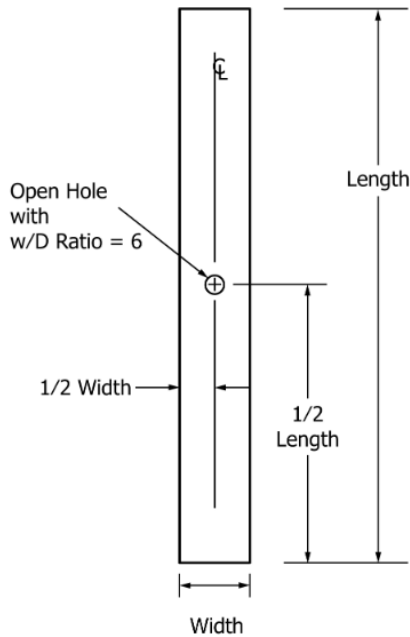
Una vez obtenido y enfriado el material compuesto final, se recorta al tamaño deseado, se verifica que cumpla con la textura y consistencia determinadas, y se limpia con alcohol isopropílico para eliminar exceso de desmoldante que haya quedado residual, esto con el objetivo de mejorar el agarre del material.

### **2.4 Caracterización**

Con el fin de estudiar las propiedades mecánicas más relevantes, se realizaron los siguientes ensayos, utilizando la Máquina Bionix Tabletop modelo 370-02 proporcionada por la Universidad Industrial de Santander.

- 1. Ensayo de tracción según norma ASTM D3039.**
- 2. Ensayo de tracción open hole según norma ASTM D5766/D5766M-11.**

**Figura 3** *Dimensiones probeta para ensayo de tracción open hole.*



Nota. Dimensionamiento de probeta para ensayo open hole. Tomado de American Society for Testing and Materials, 2017

Las dimensiones de estas probetas fueron tomadas directamente de los documentos proporcionados por la ASTM, la cual indica que la forma de ellas debe de tener sección transversal rectangular constante, además se tomó según las recomendaciones de la norma un ancho de 25 mm largo de 22mm y el espesor era de 3 mm aproximadamente. Asimismo, los ensayos fueron realizados con una velocidad de 5mm/min. Y una presión de agarre de 1500 psi con las mordazas de referencia 647.02B de 25 mm.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Pruebas preliminares, método de preparación y definición de composición.

Durante la fase de definir la composición del material se encontró que una cantidad de agua de más del 50% en la mezcla de la matriz de almidón de yuca utilizada para el material, generaba que el material resultara débil al tacto, es decir este al sacarse del horno empezó a descomponerse, además de esto se encontró que también debido a la gran cantidad de agua dentro de este material dependiendo de las condiciones en las que se encontrara el vapor de agua generaba que el material se inflara y quedara totalmente inutilizable.

Igualmente se encontró que la cantidad de glicerina usada en la mezcla también afectaba en gran medida en las propiedades físicas y consistencia del material, ya que si esta era más del 30% el material quedaba más gelatinoso que sólido, al mismo tiempo que si este era menor que el 15% este quedaba mucho más frágil, el punto de equilibrio encontrado en esta investigación fue 20%.

Adicionalmente el método de secado fue un factor de alta importancia ya que, si la temperatura era demasiado alta, más de 120 grados centígrados aproximadamente esta empezaba a cristalizarse y a quebrarse en algunas zonas por la expansión, pero si era mucho menor a 100 grados centígrados esta no lograba evaporar el agua correctamente y también dañaba el resultado final. Asimismo, factores como la compresión del material en el molde, y un correcto pre secado y post secado, ayudan a afianzar el material y que este tome la consistencia deseada.

En las pruebas preliminares para seleccionar la composición ideal para la matriz del material compuesto, se evaluaron varios factores cruciales que guiaron la elección final, incluyendo la textura, flexibilidad y el éxito en el proceso de secado del material. Se prestó especial atención a la textura y flexibilidad para garantizar que el material cumpliera con los requisitos de manejabilidad y rendimiento esperado, mientras que la efectividad del secado fue esencial para asegurar la integridad del producto. Además, se realizaron pruebas caseras con diferentes pesos

para evaluar la resistencia y funcionalidad del material en condiciones prácticas antes de llevar las muestras a pruebas de laboratorio. Esta evaluación inicial permitió confirmar que las muestras estaban adecuadamente preparadas para someterse a ensayos más rigurosos

### **3.2 Caracterización mecánica**

Durante esta fase se encontró que el material era débil a la compresión y cortante, debido a que punto de agarre del material con la máquina de ensayo a tracción Bionix era un factor influyente en el material, demasiada presión en la zona de agarre hacía que destrozara el material. Finalmente se encontró un punto de equilibrio donde el material quedara suficientemente ajustado para realizar las pruebas sin destruirse. A pesar de esto se encontró en el 80% de las probetas que este punto de agarre superior mayormente era la zona de ruptura del experimento. Esto se atribuyó mayormente a la naturaleza del material.

#### **1. Material compuesto sin fibra:**

- Ensayo open hole: Esfuerzo máximo de 0.32 MPa, deformación de 5.3537 % y un módulo de Young de 5.8622 MPa.
- Ensayo estándar: Esfuerzo máximo de 0.42 MPa, deformación de 7.57% y un módulo de Young de 6.39 MPa.

#### **2. Material compuesto con 10% de fibra en volumen:**

- Ensayo estándar: Esfuerzo máximo de 0.78 MPa, deformación de 2.1629 % y un módulo de Young de 36.17 MPa.

- Ensayo open hole: Esfuerzo máximo de 0.672 MPa, deformación de 2.60% y un módulo de Young de 36.44 MPa.

### 3. **Material compuesto con 20% de fibra en volumen:**

- **Ensayo open hole:** Esfuerzo máximo de 1.083 MPa, deformación de 7.05% y un módulo de Young de 17.14 MPa.
- Ensayo estándar: Esfuerzo máximo de 1.059 MPa y deformación de 4.9% y un módulo de Young 24.55 MPa.
- **Resultados observados en las probetas:** El punto de ruptura se localizó en el lateral, donde la probeta estaba aprisionada por la máquina de ensayos, observándose un quiebre uniforme y separación de las fibras del material debido al daño causado por el agarre de la máquina.

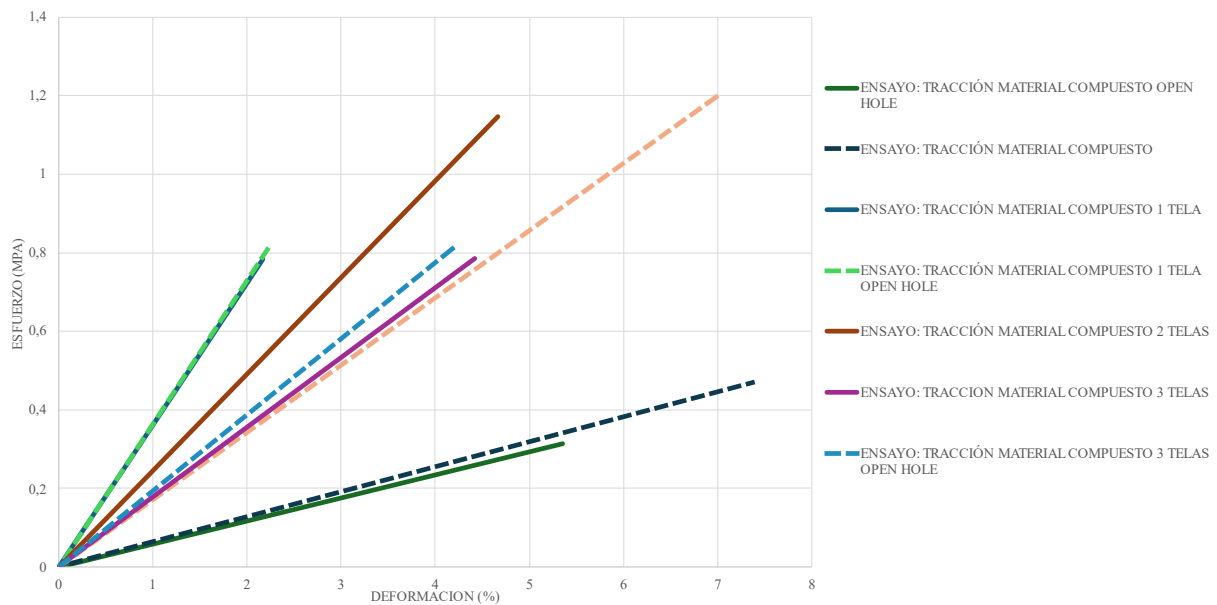
### 4. **Material compuesto con 30% de fibra en volumen:**

- Ensayo estándar: Esfuerzo máximo de 0.8 MPa, deformación de 4.80% y módulo de Young de 17.79 MPa.
- Ensayo open hole: Esfuerzo máximo de 0.855 MPa, deformación de 4.19% y módulo de Young de 19.42 MPa.
- **Resultados observados en las probetas:** La ruptura se produjo en un punto lateral de forma constante a lo largo de toda el área, sin indicios de elongación excesiva ni adelgazamiento.

En todos los ensayos, se observó que las probetas presentaron un punto de ruptura en los laterales, sin adelgazamiento del área. Comparando los valores obtenidos, se concluyó que el material compuesto con un contenido de 20% de fibra en volumen presentó los mayores valores de esfuerzo máximo y deformación. Además de los datos mencionados anteriormente en la figura

4 podemos observar la gráfica del comportamiento de los materiales ensayados a tracción en su forma estándar y su forma open-hole, en la cual encontraremos un comportamiento lineal en todos los materiales ensayados.

**Figura 4** Grafica esfuerzo vs deformación de los materiales compuestos sin tela, 1 tela (10%), 2 telas (20%), 3 telas (30%) de volumen en fibra.



En las figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12, se muestran las probetas utilizadas en ensayos de tracción. En todas estas figuras, se observa un punto de ruptura en los laterales de las probetas, siendo este el lugar donde el material se ve afectado por el agarre de la máquina de ensayos. No se observan indicios de elongación excesiva ni adelgazamiento en los puntos de ruptura, adicionalmente las probetas muestran modos de ruptura uniformes a todo lo ancho, ni daño visible por el agarre.

**Figura 5**

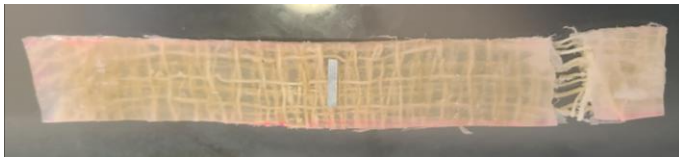
*Probeta material compuesto con fibra al 30% de volumen open hole.*



*Nota.* La fotografía representa el modo de fallo de la probeta indicada.

**Figura 6**

*Probeta material compuesto con fibra al 30% de volumen.*



*Nota.* La fotografía representa el modo de fallo de la probeta indicada.

**Figura 7**

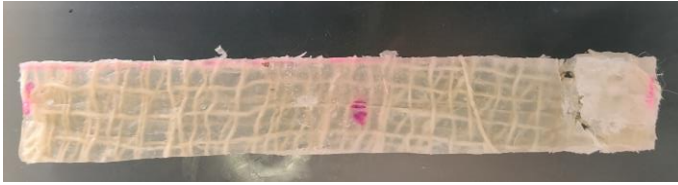
*Probeta material compuesto con 20% en volumen de fibra de hoja de piña open hole.*



*Nota.* La fotografía representa el modo de fallo de la probeta indicada.

**Figura 8**

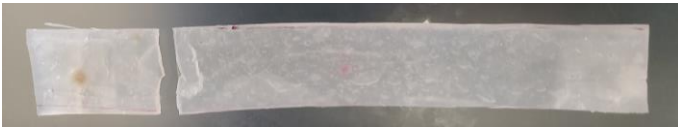
*Probeta material compuesto con 20% en volumen de fibra de hoja de piña estándar.*



*Nota.* La fotografía representa el modo de fallo de la probeta indicada.

### **Figura 9**

*Probeta del ensayo de tracción material compuesto.*



*Nota.* La fotografía representa el modo de fallo de la probeta indicada.

### **Figura 10**

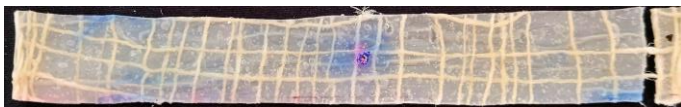
*Probeta ensayo de tracción open hole material compuesto.*



*Nota.* La fotografía representa el modo de fallo de la probeta indicada.

### **Figura 11**

*Probeta ensayo de tracción open hole material compuesto con 10% de volumen de fibra de hoja de piña.*



*Nota.* La fotografía representa el modo de fallo de la probeta indicada.

**Figura 12**

*Probeta ensayo de tracción estándar material compuesto con 10% de volumen de fibra de hoja de piña.*



*Nota.* La fotografía representa el modo de fallo de la probeta indicada.

**4. Conclusiones.**

1. Se determinó que encontrar un equilibrio entre el almidón, glicerina y agua fue un factor crítico, ya que de esto dependía el tipo de material resultante. En este caso particular, el objetivo fue lograr un balance entre la resistencia a la tracción, el espesor y la flexibilidad del material. Por ello, se escogió la composición de la matriz de 40A 20G 40A, dado que esta fue la que tuvo un secado exitoso, además de pasar las pruebas preliminares de inspección visual y resistencia con diferentes pesos, teniendo el menor número de imperfecciones, menor número de burbujas y una consistencia deseada.
2. El método de secado del material demostró ser altamente influyente en la obtención de un resultado final satisfactorio. Fue necesario eliminar una cantidad significativa de agua presente en la mezcla sin comprometer la consistencia y demás componentes del material. Para poder lograr esta finalidad se encontró que la temperatura apta para este proyecto fue de 105 grados centígrados, en vista de que con esta se logró una consistencia y calidad del producto final aceptable.

3. Los resultados de los ensayos mostraron que el material compuesto con un 20% de fibra de hoja de piña en volumen presentó los mejores resultados en términos de propiedades mecánicas, visto que este material exhibió la mayor deformación máxima, alcanzando 7%, y mantuvo un alto esfuerzo a la tracción de 1.08MPa, superando a las demás muestras analizadas, lo cual indica que un contenido de 20% de fibra proporciona un equilibrio adecuado entre flexibilidad y resistencia, lo que podría mejorar significativamente el rendimiento del material en aplicaciones que requieran este nivel de resistencia y deformación.
4. Se evidenció que el agarre de la máquina de ensayos afectaba significativamente el punto de ruptura del material compuesto, generando un punto de debilidad en los laterales debido a la presión excesiva ejercida por las mordazas. Este efecto influyó en los resultados de los ensayos, haciendo que los puntos de ruptura no reflejaran con precisión las propiedades intrínsecas del material.
5. En la producción de los paneles de material compuesto reforzados con tela, se observó que el espaciado entre las hebras de la tela influye significativamente en la integración de la matriz de almidón de yuca y el refuerzo de hoja de piña. Se identificó que un espaciado menor entre las hebras dificultaba la penetración de la matriz a través del refuerzo, resultando en una separación de las capas y una unión incompleta del material. En cambio, al aumentar el espaciado entre las hebras, la matriz pudo atravesar mejor el refuerzo, favoreciendo una mayor adhesión entre la matriz y el refuerzo. Este ajuste en el espaciado demostró ser crucial para mejorar la cohesión del material compuesto, sugiriendo que un mayor espaciado entre las hebras facilita una integración más efectiva del material.

## 5. Recomendaciones.

Se recomienda llevar a cabo una exploración más exhaustiva sobre el uso de glicerina en la fabricación del material compuesto, ya que tanto la literatura como los experimentos realizados han demostrado que la glicerina tiene un impacto significativo en las propiedades finales del material. Debido a que la glicerina influye en el equilibrio entre flexibilidad y resistencia, investigar diferentes concentraciones y métodos de incorporación podría optimizar estas características. Además, se debe mejorar la adhesividad entre la matriz de almidón de yuca y el refuerzo de fibra de hoja de piña, dado que los ensayos mostraron que la matriz tiende a fallar antes que el refuerzo, limitando así el esfuerzo máximo del material compuesto. Argumentando que una mayor adhesión entre estos componentes podría incrementar la resistencia general, se sugiere investigar y aplicar tratamientos o aditivos que potencien esta adhesión.

En relación con el proceso de fabricación, es esencial optimizar tanto el prensado como el secado del material, ya que esto permitirá minimizar los espacios vacíos y asegurar una homogeneidad en toda su área transversal. Considerando que un proceso de prensado y secado ajustado puede mejorar la consistencia y calidad del producto final, se debe prestar especial atención a estos aspectos. Finalmente, se debe mejorar el manejo del molde y el prensado para garantizar uniformidad en el espesor y dimensiones del material, debido a que procedimientos más rigurosos durante el moldeo y prensado contribuirán a obtener un producto más uniforme y reducirán las variaciones en sus propiedades mecánicas.

### Referencias Bibliográficas

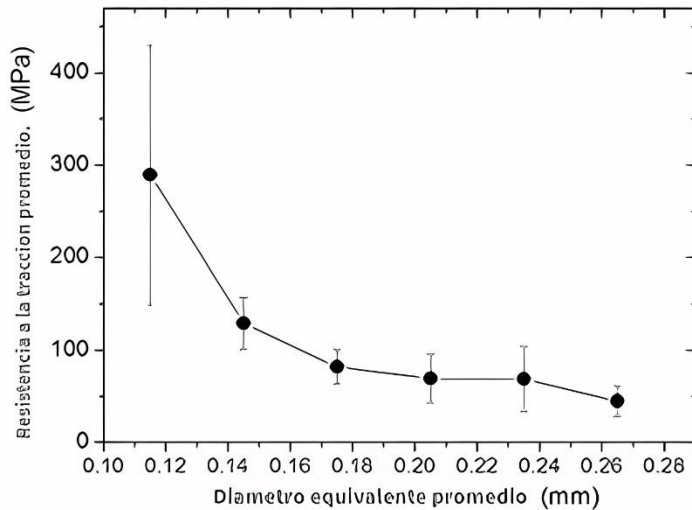
- Alajmi, A., Abousnina, R., Shalwan, A., Alajmi, S., Alipour, G., Tafsirojjaman, T., ... & Will, G. (2022). An experimental and numerical investigation into the durability of fibre/polymer composites with synthetic and natural fibres. *Polymers*, 14(10), 2024. <https://doi.org/10.3390/polym14102024>
- American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials [Método de Prueba Estándar para Propiedades de Tracción de Materiales Compuestos de Matriz Polimérica.]. Book of Standards, 15.03. [https://doi.org/10.1520/D3039\\_D3039M-17](https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17)
- American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Test Method for Open-Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates [Método de prueba estándar para la resistencia a la tracción de agujero abierto de laminados compuestos de matriz polimérica.]. En Book of Standards: Vol. 15.03. [https://doi.org/10.1520/D5766\\_D5766M-11R18](https://doi.org/10.1520/D5766_D5766M-11R18)
- Asim, M., Abdan, K., Jawaid, M., Nasir, M., Dashtizadeh, Z., Ishak, M. R., Hoque, M. E., & Deng, Y. (2015). A review on pineapple leaves fibre and its composites [Una revisión sobre las fibras de hojas de piña y sus compuestos.]. *International Journal of Polymer Science*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/950567>
- Barrera, R., Ardila, A. N., & Murcia, J. F. (2020). Producción de etanol a partir de piñas de rechazo de cultivos del chocó. *Revista ION*, 33(1). <https://doi.org/10.18273/revion.v33n1-2020005>
- Castro, J. I., Porras, D. P. N., Cortés, J. A. A., Mina, J. S. A., & Grande-Tovar, C. D. (2022). Synthesis, characterization, and optimization studies of starch/chicken gelatin composites

- for food-packaging applications. *Molecules*, 27(7), 2264.  
<https://doi.org/10.3390/molecules27072264>
- DANE. (2022). Encuesta Ambiental Industrial (EAI): Boletín técnico. En [www.dane.gov.co](http://www.dane.gov.co).  
Recuperado 5 de julio de 2024, de  
[https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/EAI/2020/bol\\_EAI\\_2020.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/EAI/2020/bol_EAI_2020.pdf)
- Hadi, A. E., Siregar, J. P., Cionita, T., Norlaila, M. B., Badari, M. A. M., Jaafar, J., ... & Fitriyana, D. F. (2022). Potentiality of utilizing woven pineapple leaf fibre for polymer composites. *Polymers*, 14(13), 2744. <https://doi.org/10.3390/polym14132744>
- Ibrahim, I., Hamam, Y., Sadiku, R., Ndambuki, J., Kupolati, W., Jamiru, T., ... & Snyman, J. (2022). Need for sustainable packaging: an overview. *Polymers*, 14(20), 4430.  
<https://doi.org/10.3390/polym14204430>
- Jawaid, M., Asim, M., Tahir, P. M., & Nasir, M. (2020). Green Energy and Technology Pineapple Leaf Fibers Processing, Properties and Applications. <http://www.springer.com/series/8059>
- Lee, J., Abdan, K., Lee, S. H., Padzil, F., & Ainun, Z. M. A. (2020). Physical, Morphological, Structural, Thermal and Mechanical Properties of Pineapple Leaf Fibers [Propiedades Físicas, Morfológicas, Estructurales, Térmicas y Mecánicas de las Fibras de Hoja de Piña.]. En M. Jawaid, M. Asim, P. Md. Tahir, & M. Nasir (Eds.), *Green Energy and Technology Pineapple Leaf Fibers Processing, Properties and Applications* (pp. 91-121). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <http://www.springer.com/series/8059>
- Pujari, S. (2010). Comparison of Jute and Banana Fiber Composites: A Review. *International Journal Of Current Engineering And Technology*, 2(2), 121-126.  
<https://doi.org/10.14741/ijcet/spl.2.2014.22>

- Robayo-Salazar, R., Hermann, J. P., Padrón, U. D., & Castrillón, O. P. (2020). Materiales compuestos ablativos de matriz polimérica y su aplicación en la fabricación de componentes de propulsión aeroespacial. *Revista Facultad De Ingeniería*, 29(54), e10662. <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10662>
- Ruiz Avilés, G. (2005). Polímeros biodegradables a partir del almidón de yuca. En Universidad EAFIT. <https://core.ac.uk/download/pdf/47250396.pdf>
- Salinas, J. G. P., Salinas, C. F. P., & Miniguano, C. B. C. (2017). Análisis de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de vidrio 375 y cabuya aplicada a la industria automotriz. *Enfoque UTE*, 8(3), 1-15. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n3.163>
- Sander, M. (2019). Biodegradation of polymeric mulch films in agricultural soils: concepts, knowledge gaps, and future research directions. *Environmental Science & Technology*, 53(5), 2304-2315. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05208>

## Apéndices

### Apéndice A Resistencia a la tracción de la fibra de hoja de piña respecto al diámetro



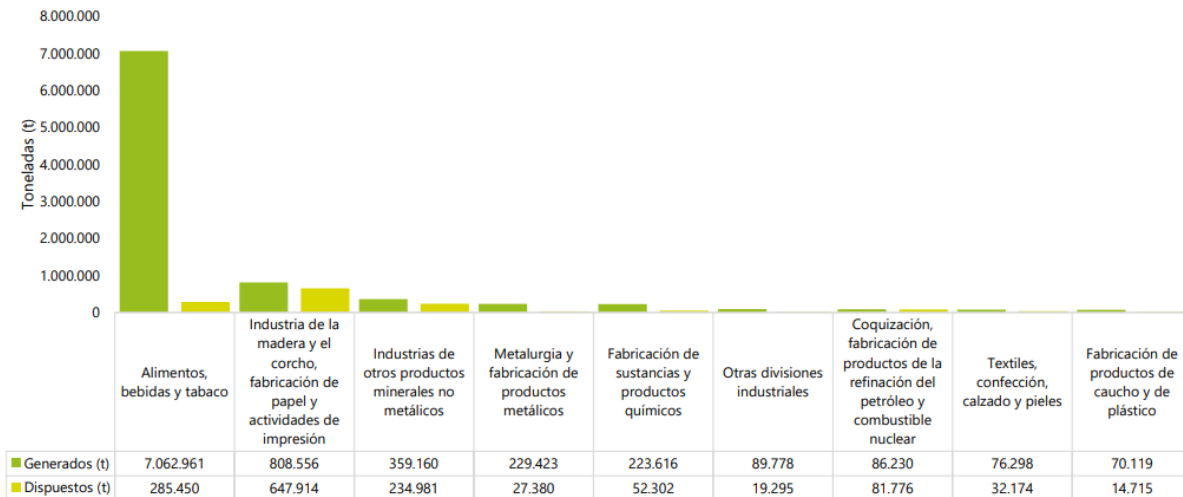
*Nota.* El gráfico representa los resultados experimentales de la resistencia a la tracción sobre fibras de hojas de piña de diferentes diámetros. Tomado de: Lee et al., 2020

### Apéndice B Fuerza física y mecánica de la fibra de hoja de piña.

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo a la tracción. (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento a la rotura. (%)	Dia, (cm)
1,52	413-1627	34,5-82,51	1,6—3	20-80
1.526	413	62,1	1,6	50
1,07	126,6	4.405	2,2	
1.526	413	6,5	1,6	30-60
1.526	170	62,1	3	
1,44	413-1627	34,5-82,51		20-80
1,44	413-1627	34,5-82,51	1,6	20-80

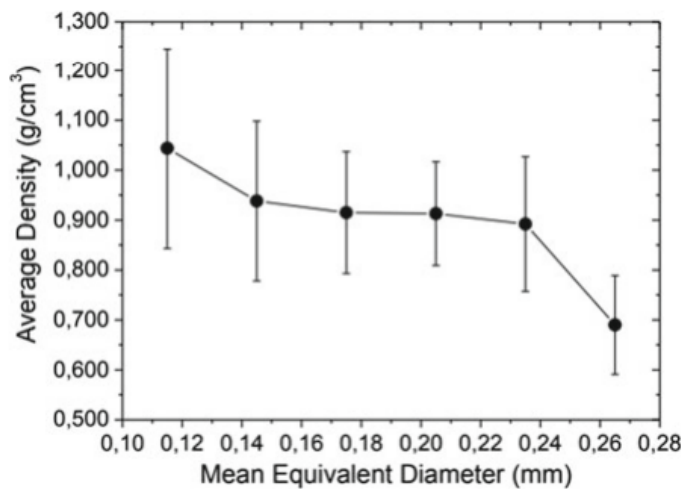
*Nota.* La tabla contiene los datos experimentales de las propiedades mecánicas de las fibras de hoja de piña de diferentes diámetros. Tomado de: Asim et al., 2015

**Apéndice C Distribución de los residuos sólidos generados y dispuestos por los establecimientos industriales según dominios de actividades industriales (toneladas) Total Nacional 2020**



Tomado de (DANE, 2022)

**Apéndice D Diámetros de las fibras de PALF y sus densidades promedio correspondientes.**



Nota. Fuente: (Jawaid et al., 2020)

**Apéndice E Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la tracción en agujero abierto de laminados compuestos de matriz polimérica. ASTM D5766/D5766M-11(2018)**

Este método de prueba determina la resistencia a la tracción en agujero abierto de laminados compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de alto módulo. Las formas del material compuesto están limitadas a compuestos reforzados con fibras continuas o discontinuas (cinta o tejido, o ambos) en los cuales el laminado es equilibrado y simétrico con respecto a la dirección de prueba.(American Society for Testing and Materials, 2018)

Se realiza una prueba de tensión uniaxial en un laminado equilibrado y simétrico de acuerdo con el Método de Prueba D3039/D3039M, con un agujero ubicado centralmente, además el uso de transductores de desplazamiento de extensómetros montados en los bordes es opcional.(American Society for Testing and Materials, 2018)

La resistencia última se calcula en función del área bruta de la sección transversal, sin tener en cuenta la presencia del agujero. Aunque el agujero provoca una concentración de tensiones y una reducción de la sección neta, es una práctica común en la industria aeroespacial desarrollar resistencias admisibles de diseño con muescas basadas en el estrés de la sección bruta para tener en cuenta varias concentraciones de tensiones (agujeros de sujetadores, bordes libres, defectos, daños, etc.) que no se modelan explícitamente en el análisis de tensiones.(American Society for Testing and Materials, 2018)

El único modo de falla aceptable para la resistencia última a la tracción en agujero abierto es aquel que pasa a través del agujero en la muestra de prueba.(American Society for Testing and Materials, 2018)

Este método de prueba está diseñado para obtener datos de resistencia a la tracción con muescas para permitir el diseño estructural, las especificaciones del material, la investigación y el desarrollo, y el aseguramiento de la calidad. Los factores que influyen en la resistencia a la tracción con muescas y que, por lo tanto, deben ser informados, incluyen lo siguiente: el material, los

métodos de fabricación del material, la precisión del laminado, la secuencia de apilamiento del laminado y el espesor total, la geometría de la muestra (incluido el diámetro del agujero, la relación diámetro-espesor y la relación ancho-diámetro), la preparación de la muestra (especialmente del agujero), el acondicionamiento de la muestra, el entorno de prueba, la alineación y sujeción de la muestra, la velocidad de prueba, el tiempo a temperatura, el contenido de poros y el porcentaje volumétrico de refuerzo.(American Society for Testing and Materials, 2018)

#### **Apéndice F Método de prueba estándar para las propiedades de tracción de los materiales compuestos de matriz polimérica.**

Este método de prueba determina las propiedades de tracción en el plano de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de alto módulo. Los formatos de material compuesto se limitan a aquellos reforzados con fibras continuas o discontinuas (cinta o tela, o ambos) en los cuales la lámina está balanceada y simétrica con respecto a la dirección de prueba.(American Society for Testing and Materials, 2017)

En este método de prueba, se somete una delgada tira plana de material con una sección transversal rectangular constante a una carga monótona en tensión utilizando una máquina de prueba mecánica, durante la prueba, se registra la fuerza aplicada y se puede determinar la resistencia máxima del material antes de sufrir falla., si se monitorea la deformación del cupón con transductores de deformación o desplazamiento, se puede determinar la respuesta de esfuerzo-deformación del material, a partir de la cual se pueden obtener la deformación máxima en tensión, el módulo de elasticidad en tensión, el coeficiente de Poisson y la deformación de transición.(American Society for Testing and Materials, 2017)