

Desarrollo y caracterización mecánica de madera plástica a partir de residuos vegetales y  
plástico reciclado

Alejandro Vega Zuluaga

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Metalúrgico

Directora

Mayra Eliana Valencia Zapata

PhD en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi esposa, quien ha sido el pilar fundamental de este logro. Su apoyo incondicional, su paciencia y su fe en mí me sostuvieron incluso en los momentos en los que yo mismo dudé. Cada vez que quise renunciar o detener el camino, estuvo ahí para guiarme, acompañarme y recordarme que soy capaz.

A mi madre, por enseñarme, con su ejemplo, la importancia de luchar por mis sueños, resistir ante las dificultades y trabajar por un futuro mejor. A pesar de la distancia y de las adversidades, siempre logró hacerme sentir amado y acompañado.

A mi hermano menor, por ser una constante motivación para superarme y alcanzar las metas que me propuse. Su compañía y las conversaciones compartidas durante las jornadas de estudio se convirtieron en recuerdos que atesoro profundamente.

A mi nono y a mi nona, por su amor incondicional, por siempre tener un lugar para mí y por brindarme cuidado y afecto en cada etapa. Su apoyo fue fundamental para que este logro fuera posible.

Finalmente, dedico este trabajo a mis compañeros y amigos de la universidad, quienes con su compañía, risas y apoyo hicieron más llevadero este camino. Aunque hoy ya no compartamos los mismos salones, esos momentos quedarán para siempre en mi memoria.

### **Agradecimientos**

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que, de manera directa o indirecta, contribuyeron significativamente al desarrollo y culminación de este trabajo de grado.

A mis amigos de la facultad: Stiven Ortega, Darwin Cárdenas, Elizabeth Montenegro, Juan Diego Bautista, Paula Duarte, Juan Pablo Marín, Santiago Vargas, Santiago Reyes, Santiago Orduz y Silvia Sierra. Gracias por recorrer este camino a mi lado, por estar presentes en cada clase, en cada momento de incertidumbre y en cada parcial. Sin su apoyo incondicional y su compañía, este logro simplemente no habría sido posible.

A mis amigos de la universidad: Lizeth Ramírez, Agatha Coral y Alejandra Segura, quienes con su amistad hicieron que este proceso académico fuera mucho más ameno, gratificante y lleno de aprendizajes compartidos fuera de las aulas.

A mi familia, mi roca y mi sustento. Gracias por apoyarme en los momentos más difíciles, aquellos que nunca habría podido sobrellevar solo: a mi primo hermano Santiago, a Bardock Mohamed, Nohemí García, y Luis Rueda. A mi mejor amigo Esteban Gonzales por acompañarme en todo este proceso entre risas y consejos. Un agradecimiento especial y eterno a mi padre, Gerardo Vega, por su compañía y apoyo en todo momento.

Finalmente, a mis profesores: Mayra Valencia, Carlos Galán, Andrés González y Ana María Pérez. Gracias por su guía constante, por compartir su conocimiento con generosidad y por enseñarme siempre el camino correcto y los ideales de excelencia a alcanzar en mi vida profesional

## Tabla de Contenido

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>1. OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Objetivo General.....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>11</b>
<b>2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Marco Referencial.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1 Compuesto de madera plástica (WPC).....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.2 Matriz polimérica.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.3 Refuerzo vegetal.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.4 Aditivos.....</b>	<b>17</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Adecuación de materias primas.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Planteamiento del diseño experimental.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Conformado de los WPC.....</b>	<b>20</b>
<b>3.4 Caracterización de los WPC.....</b>	<b>20</b>
<b>3.4.1 Ensayos mecánicos.....</b>	<b>20</b>
<b>3.4.1.1. Tensión.....</b>	<b>20</b>
<b>3.4.1.2 Flexión.....</b>	<b>20</b>
<b>3.4.1.3 Dureza.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4.2. Ensayos físicos.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4.2.1. Rugosidad.....</b>	<b>21</b>

3.4.2.2.	Longitud y espesor de fibra.....	21
3.4.2.3.	Densidad.....	22
3.4.2.4.	Ángulo de contacto.....	22
3.4.2.5.	Absorción de humedad.....	22
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>23</b>
4.1	Caracterización morfológica.....	23
4.1	Ensayos mecánicos.....	27
4.1.1	Tensión.....	27
4.1.2	Flexión.....	30
4.1.3	Dureza.....	32
4.2	Ensayos físicos.....	34
4.2.1	Densidad.....	34
4.2.2	Ángulo de contacto.....	35
4.2.3	Absorción de humedad.....	37
4.3	Simulación 3D.....	38
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>39</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>42</b>

**Tabla de Figuras**

<b>Figura 1</b> .....	<b>20</b>
<b>Figura 2</b> .....	<b>24</b>
<b>Figura 3</b> .....	<b>26</b>
<b>Figura 4</b> .....	<b>28</b>
<b>Figura 5</b> .....	<b>31</b>
<b>Figura 6</b> .....	<b>33</b>
<b>Figura 7</b> .....	<b>35</b>
<b>Figura 8</b> .....	<b>36</b>

**Figura 9..... 38**  
**Figura 10..... 39**

## Resumen

**Título:** Desarrollo y caracterización mecánica de madera plástica a partir de residuos vegetales y plástico reciclado

**Autor:** Alejandro Vega Zuluaga

**Palabras Clave:** Madera plástica, PEAD reciclado, fibra de fique, fibra de piña, caracterización mecánica, sostenibilidad.

**Descripción:** El objetivo de esta investigación fue analizar las propiedades físicas y mecánica de compuestos de madera plástica (WPC) preparados con polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado y fibras lignocelulósicas de origen local: fibras de hoja de piña y fibras de hoja de fique. El procedimiento experimental incluyó la adecuación y preparación de fibras (secado, molienda y tamizado), la dosificación de los componentes (incluido el polietileno injertado con anhídrido maleico (PE-g-MAH) como compatibilizador), la mezcla mediante reometría de torque y el conformado por prensado en caliente y corte láser. Se analizaron cinco mezclas para cada sistema con contenido másico de refuerzo: 0%, 20%, 40%, 60% y 80%. La caracterización mecánica, realizada mediante ensayos de tensión, flexión y dureza, evidenció un incremento significativo de la rigidez del material con la adición de fibras, alcanzando un aumento del módulo de elasticidad del 437,9 % para el 80 % de fibra de piña, la resistencia a la tensión presentó un valor máximo de 32 MPa al 40 % de fibra de piña, la ductilidad disminuyó progresivamente con el incremento del refuerzo. Además, se evaluó el WPC a través de ensayos de densidad, ángulo de contacto y absorción de humedad, se observó un aumento de la densidad y de la susceptibilidad higroscópica, junto con una reducción de la hidrofobicidad superficial al incrementar el contenido de fibra. Finalmente, se realizó una simulación sobre un perfil estructural de WPC, la cual mostró una distribución de esfuerzos coherente con el comportamiento mecánico experimental.

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales. Directora: Mayra Eliana Valencia Zapata. PhD en ingeniería



## Introducción

Los compuestos de madera plástica (WPC, por sus siglas en inglés) son materiales compuestos constituidos por una matriz polimérica continua, de naturaleza termoestable o termoplástica, y un refuerzo lignocelulósico disperso a base de madera (Jian et al., 2022; Panthapulakkal et al., 2006). Estos materiales se fabrican comúnmente mediante procesos de extrusión, seguidos de moldeo por inyección o compresión, lo que permite la producción eficiente de una amplia variedad de productos. El contenido del componente vegetal en los WPC puede superar el 80 % (Teuber et al., 2016), y su formulación incluye, además de la matriz y el refuerzo, diversos aditivos —como agentes de acoplamiento, lubricantes y estabilizadores— incorporados para ajustar y optimizar las propiedades finales del material (Ashori, 2008). Como resultado, los WPC combinan características propias del plástico y de la madera, tales como ligereza, alta estabilidad dimensional, resistencia a la corrosión, durabilidad ambiental, propiedades antibacterianas, reciclabilidad, bajo costo y facilidad de procesamiento (Xiao et al., 2023). Estas ventajas han impulsado su aplicación en sectores como la automoción, el hogar, la construcción, los materiales de embalaje y los dispositivos electrónicos (Gu et al., 2016; Nayak et al., 2022).

Las propiedades físicas y mecánicas de los WPC dependen de múltiples factores, entre ellos el tipo de refuerzo vegetal, la naturaleza del polímero, las condiciones de procesamiento y la composición global del material (Benthien & Thoemen, 2012; Leu et al., 2012). Tradicionalmente, estos compuestos se han elaborado a partir de plásticos vírgenes como el polipropileno (PP), el polietileno (PE) y el cloruro de polivinilo (PVC); entre ellos, el PE virgen concentra aproximadamente el 83 % de la cuota de mercado, seguido del PVC (9 %) y del PP (7 %) (Sobczak et al., 2012). Como refuerzo se emplean principalmente partículas o harinas de madera, obtenidas a partir de maderas sólidas molidas (Sobczak et al., 2012), las cuales presentan una morfología

rugosa e irregular (Arribasplata-Seguin et al., 2021) y son consideradas especialmente adecuadas debido a su estructura robusta y a sus favorables propiedades mecánicas (Elsheikh et al., 2022).

En paralelo, la tendencia a sustituir plásticos vírgenes (VP) por plásticos reciclados (RP) se ha intensificado como respuesta al aumento en la generación de residuos plásticos (Hyvärinen et al., 2019) y a la necesidad de reducir costos de producción, dado que el uso de RP puede representar un ahorro del 20 al 50 % frente al VP (Gu et al., 2017). En este contexto, los WPC basados en RP priorizan el empleo de un único tipo de plástico reciclado, mezclas de VP y RP o combinaciones de distintos plásticos reciclados, contribuyendo así a la mitigación de la contaminación ambiental, a la reducción de la dependencia de recursos petrolíferos y al fomento del uso de materiales renovables (Kong et al., 2023). No obstante, el reciclaje de plásticos conlleva procesos de degradación química de las cadenas poliméricas, lo que hace necesario un conocimiento profundo de las estructuras fundamentales del RP para garantizar un desempeño adecuado del material en condiciones de servicio (Kassab et al., 2023).

Adicionalmente, diversas investigaciones han explorado la incorporación de refuerzos minerales o inorgánicos en la formulación de los WPC con el fin de mejorar su resistencia mecánica, particularmente en términos de impacto y tracción (Gwon et al., 2012; Huuhilo et al., 2010; Kaymakci, 2022; Ozyhar et al., 2020). Gracias a la combinación de la matriz polimérica, el refuerzo lignocelulósico y los aditivos funcionales, estos compuestos presentan propiedades físicas y mecánicas favorables, entre las que destacan el aislamiento térmico y acústico, el incremento de la rigidez y la reducción de costos asociada al uso de partículas de origen vegetal. Asimismo, la adición de aditivos permite optimizar el comportamiento mecánico del material, mejorar su resistencia a la inflamabilidad y aumentar su estabilidad frente a la radiación ultravioleta, el calor y los cambios de color, lo que posiciona a los WPC como una alternativa viable para la sustitución

de la madera en múltiples aplicaciones. De manera simultánea, estos materiales contribuyen a la reducción de la huella de carbono, al aprovechamiento de residuos y, potencialmente, a la disminución de los costos de producción en el mediano y largo plazo. En este marco, y ante la creciente demanda mundial de madera, la presión sobre los ecosistemas forestales y el aumento de la conciencia ambiental, la investigación y el desarrollo de materiales basados en WPC se han consolidado como una línea prioritaria de trabajo.

La acumulación de residuos plásticos y vegetales constituye un problema ambiental de alcance global, asociado a la contaminación de suelos y cuerpos de agua, la degradación de ecosistemas y la creciente presión sobre los sistemas de gestión de residuos. Estos desechos, en su mayoría no biodegradables, representan un desafío significativo para la sostenibilidad, especialmente en contextos urbanos e industriales donde se concentran grandes volúmenes de plástico posconsumo y subproductos agrícolas. En este escenario, la madera plástica se ha consolidado a nivel internacional como una alternativa tecnológica capaz de transformar dichos residuos en materiales funcionales y duraderos, contribuyendo simultáneamente a la mitigación del impacto ambiental y a la generación de valor agregado.

El desarrollo del presente proyecto se justifica por la necesidad de ofrecer soluciones materiales que integren el aprovechamiento de residuos plásticos y vegetales de origen local con la producción de compuestos de alto desempeño, orientados principalmente a aplicaciones en la industria de la construcción y del mobiliario. Desde una perspectiva teórico-científica, la investigación contribuye al conocimiento existente sobre los compuestos madera plástica al evaluar sus propiedades físicas y mecánicas, cuando se emplean matrices de plástico reciclado y refuerzos vegetales locales, lo que permite un primer acercamiento para entender su comportamiento y potencial de uso en escenarios reales de servicio. En el plano metodológico, el

estudio aporta un procedimiento de formulación, fabricación y caracterización de estos compuestos, susceptible de ser replicado o adaptado en futuras investigaciones que involucren distintos tipos de residuos o matrices poliméricas.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de materiales compuestos de madera plástica, fabricados a partir de polietileno reciclado y dos tipos de fibras lignocelulósicas provenientes de residuos vegetales (fibra de hoja de piña y fibra de hoja de fique).

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar el comportamiento mecánico de compuestos de madera plástica con diferentes proporciones de residuos vegetales, mediante ensayos de tracción, flexión y dureza.
- Determinar el efecto de la variación en la composición del material sobre sus propiedades físicas, a través de ensayos de absorción de humedad, ángulo de contacto y densidad.
- Modelar una pieza funcional mediante un software de diseño asistido por computadora, incorporando los parámetros obtenidos en la caracterización desarrollada durante la investigación.

## **2. Fundamentación teórica**

### **2.1 Marco Referencial**

#### **2.1.1 Compuesto de madera plástica (WPC)**

Durante la fabricación de los WPC, resulta fundamental considerar la distribución de las fibras naturales dentro de la matriz polimérica, dado que su aglomeración puede afectar negativamente las propiedades del compuesto final. Las fibras vegetales, incluyendo las de madera, presentan una elevada afinidad por el agua debido a la presencia de grupos hidroxilo en la celulosa y la hemicelulosa, lo que favorece la formación de enlaces de hidrógeno entre fibras durante el proceso de mezclado. Este fenómeno conduce a una distribución no homogénea del refuerzo dentro del polímero, lo que compromete su capacidad de refuerzo. En consecuencia, las propiedades mecánicas del material pueden verse deterioradas, especialmente en aplicaciones estructurales que requieren una dispersión uniforme de las fibras para garantizar un desempeño adecuado. Por esta razón, la modificación de las fibras mediante tratamientos químicos, físicos o combinados se considera una estrategia clave, ya que mejora la interacción fibra–matriz y favorece una dispersión más homogénea, incrementando la eficiencia del refuerzo y la estabilidad del WPC frente a condiciones ambientales adversas.(Nirmal et al., 2015)

Los WPC presentan un conjunto de propiedades que los hace atractivos para aplicaciones estructurales e industriales, destacándose por su comportamiento mecánico, térmico y frente a la humedad. Desde el punto de vista mecánico, estos materiales pueden exhibir mejoras significativas respecto a los principales polímeros empleados en su fabricación como los termoestables, termoplásticos y elastómeros en propiedades como la resistencia a la flexión, tracción, impacto y dureza, especialmente cuando se emplean agentes acoplantes que fortalecen la adhesión interfacial entre la matriz polimérica y las fibras naturales. Dichas propiedades están fuertemente

influenciadas por factores como la fracción volumétrica de fibra, el tamaño de partícula, la relación de aspecto (longitud/diámetro) y la uniformidad de la distribución del refuerzo dentro de la matriz (Nirmal et al., 2015).

Desde una perspectiva estética y funcional, la madera plástica constituye una solución eficaz frente a problemáticas habituales de la madera convencional, como el deterioro por exposición prolongada a la intemperie, la aparición de manchas causadas por alimentos u otros agentes, y el ataque biológico por hongos o moho (Mwango & Kambole, 2019).

En términos estructurales, se valoran especialmente propiedades como su resistencia mecánica, rigidez, estabilidad térmica y dimensional, así como su mayor resistencia al fuego y su menor susceptibilidad a fenómenos como la fluencia, la expansión, la contracción y la distorsión. Estas características posicionan a los WPC como una alternativa confiable y competitiva frente a la madera tradicional en aplicaciones sometidas a condiciones ambientales exigentes (Teuber et al., 2016; Toghyani et al., 2020).

### **2.1.2 Matriz polimérica**

La matriz polimérica desempeña un papel esencial en los materiales compuestos, ya que es la responsable de transferir los esfuerzos mecánicos al refuerzo, mantener la correcta disposición y cohesión de las fibras, y proteger el material frente a agentes externos como la humedad, el ataque biológico por hongos o insectos, y el desgaste por abrasión (Puglia et al., 2005). En el caso particular de los WPC, la selección del polímero que actúa como matriz constituye un aspecto crítico, dado que está directamente condicionada por la temperatura de procesamiento. Esto se debe a que los refuerzos de origen lignocelulósico presentan una limitada estabilidad térmica y comienzan a degradarse a temperaturas superiores a 200–220 °C, lo que restringe el uso de polímeros con altos puntos de fusión (Puglia et al., 2005).

En este contexto, los polímeros termoplásticos de baja y media temperatura de procesamiento son los más empleados como matrices en WPC, entre los que destacan el polietileno (PE), en sus variantes de baja y alta densidad (LDPE y HDPE), el polipropileno (PP), el cloruro de polivinilo (PVC) y el poliestireno (PS). Adicionalmente, en aplicaciones específicas, pueden utilizarse matrices termoestables como resinas fenólicas, epóxicas o poliéster, particularmente cuando se requiere mayor rigidez estructural o estabilidad dimensional, siempre que el proceso de fabricación y la aplicación final lo permitan (Morreale et al., 2008; Srubar et al., 2012).

Entre los polímeros termoplásticos más utilizados, el polietileno de alta densidad (PEAD) se ha consolidado como una de las matrices más empleadas en la fabricación de WPC. Esto se debe a su favorable relación resistencia–densidad, con valores de densidad comprendidos entre 0,94 y 0,97 g/cm<sup>3</sup>, lo que permite obtener materiales ligeros sin comprometer su resistencia mecánica (Almohana et al., 2022). Asimismo, el PEAD presenta una elevada resistencia química y una muy baja absorción de humedad, características que contribuyen de manera significativa a la durabilidad del compuesto. Estas propiedades resultan especialmente ventajosas en aplicaciones exteriores o en ambientes húmedos, donde el material se encuentra expuesto de forma continua a condiciones ambientales adversas y se requiere un comportamiento estable a largo plazo (Almohana et al., 2022; Rahmah & Owaid, 2020).

Por otra parte, la creciente preocupación por la contaminación generada por los plásticos ha convertido al aprovechamiento de polímeros reciclados en un tema prioritario a escala global. La presencia de residuos plásticos es actualmente ubicua en ecosistemas terrestres y marinos, y su acumulación sostenida durante las últimas décadas ha alterado el equilibrio de numerosos hábitats,

generando impactos ambientales de gran magnitud asociados a la intervención antrópica (Avallone et al., 2012). Se estima que la producción mundial de plásticos aumentó aproximadamente un 7 % entre 2022 y 2023, alcanzando cerca de 418,8 millones de toneladas métricas. Para 2023, la generación de residuos plásticos se estimó en alrededor de 372,99 millones de toneladas métricas, de las cuales cerca del 89 % no fue reciclado ni reutilizado (Statista Research Department, n.d.).

Este problema se agrava al considerar que la vida útil promedio de muchos productos plásticos es cercana a los 10 años, mientras que su tiempo de degradación en el ambiente puede superar los 500 años. Como consecuencia, se ha observado una acumulación progresiva de residuos plásticos en prácticamente todos los entornos naturales, incluidos océanos profundos, regiones polares, zonas montañosas y ecosistemas tropicales (Bouwmeester et al., 2015; MacLeod et al., 2021).

### **2.1.3 Refuerzo vegetal**

Los compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales han adquirido una creciente relevancia como alternativas sostenibles frente a los compuestos reforzados con fibras sintéticas, impulsados por las preocupaciones ambientales y la necesidad de emplear recursos renovables (Belouadah et al., 2021).

Algunas de las fibras vegetales más empleadas por la industria para la fabricación de los WPC son el abacá, el bambú, el Yute de china, fibra de coco, algodón, lino, cáñamo, palma aceitera, piña, entre otros (Ashori, 2008). En general, estas fibras presentan propiedades bastante interesantes como su carácter ecológico, su biodegradabilidad, baja coste de producción, sin embargo, existen ciertos inconvenientes, como agregados en el procesamiento, baja estabilidad térmica, poca resistencia a la humedad (Ashori, 2008).

El desempeño de los compuestos reforzados con fibras naturales está determinado por la interacción entre las propiedades intrínsecas de las fibras, la calidad de la adhesión interfacial fibra–matriz y las condiciones de procesamiento, las cuales influyen directamente en la orientación, la longitud y la distribución de las fibras dentro de la matriz polimérica (Y. ; B. W. Zhong, 2017).

En este contexto, las fibras de fique y piña, originarias de América del Sur, están emergiendo como refuerzos lignocelulósicos particularmente prometedores, debido a sus adecuadas propiedades mecánicas, su amplia disponibilidad y su carácter biodegradable (Seki et al., 2018).

Las fibras de fique y de piña se utilizan como refuerzo lignocelulósico mediante procesos de fabricación como el prensado en caliente, el moldeo por compresión y la colocación manual (Lv et al., 2012; Xian, 2019). Estos métodos requieren un control riguroso de los parámetros de procesamiento, incluyendo temperaturas que suelen situarse en el rango de 150 a 200 °C, presiones moderadas y tiempos de prensado optimizados, con el fin de preservar la integridad estructural de las fibras y, al mismo tiempo, garantizar una adecuada adhesión entre la fibra y la matriz. Estas fibras presentaron resistencias a la tracción del orden de 229 MPa y un módulo de Young comprendido entre 19 y 24 GPa, valores que pueden incrementarse mediante tratamientos superficiales (Lv et al., 2012; Xian, 2019). No obstante, exhiben una variabilidad inherente en su diámetro y grado de cristalinidad, factores que influyen de manera significativa en el comportamiento mecánico final del compuesto (Belouadah et al., 2021; Muñoz-Blandón et al., 2023; Teles et al., 2015).

#### 2.1.4 Aditivos

En los WPC se emplea habitualmente una variedad de aditivos destinados a mejorar su desempeño global. Entre ellos se encuentran los líquidos iónicos, que favorecen la adhesión interfacial, la estabilidad frente al agua, la resistencia al impacto y la resistencia a la tracción (Croitoru et al., 2018); colorantes y estabilizadores UV, usados para mejorar la apariencia y la durabilidad (Advanced Composites Bulletin, 2007), cargas con: óxidos de calcio, utilizados en compuestos basados en PLA para mejorar la densidad y la susceptibilidad a la perforación (Borysiuk et al., 2022); nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT), empleados para mejorar las propiedades mecánicas y reducir la abrasión y la absorción de agua (Khantimirov et al., 2023), organoarcilla, que incrementa el rendimiento térmico y mecánico cuando se utiliza conjuntamente con PE-g-MA (Y. Zhong et al., 2007), entre otros.

El polietileno injertado con anhídrido maleico (PE-g-MA) desempeña un papel fundamental como compatibilizador ampliamente utilizado en los WPC, particularmente en aquellos a base de polietileno. Mejora la adhesión interfacial entre las fibras de madera hidrófilas y la matriz de polietileno hidrófoba, lo que conduce a una mejor dispersión y unión. Asimismo, los grupos anhídrido maleico reaccionan con los grupos hidroxilo de las fibras de la madera, formando fuertes enlaces covalentes que mejoran la integridad general del compuesto (Shi et al., 2007; Y. Zhong et al., 2007).

La adición de PE-g-MA aumenta significativamente la resistencia a la tracción y a la flexión de los WPC; la resistencia a la tracción puede incrementarse hasta un 157 % y la resistencia a la flexión hasta un 146 % (Shi et al., 2007) También mejora la resistencia al impacto, haciéndolos

más duraderos bajo sollicitaciones mecánicas (Elamin et al., 2020) y reduce la absorción de agua, mejorando su idoneidad para aplicaciones exteriores (Wang, 2021).

### **3. Metodología**

La metodología empleada en el presente trabajo se desarrolló en distintas fases, las cuales se observan en la figura 2. En primer lugar, se realizó la adquisición de las materias primas. La fibra de fique fue suministrada por la cooperativa Ecofibras, ubicada en Curití, Santander, la fibra de piña se obtuvo de la empresa Green Leaf, en Lebrija, Santander y el PEAD reciclado de Soldeplast en Piedecuesta, Santander.

Posteriormente, las fibras fueron sometidas a un proceso de acondicionamiento que incluyó etapas de selección, corte, molienda y secado de las materias primas, adicionalmente se les realizó una reducción de tamaño y secado controlado, con el fin de garantizar condiciones adecuadas de homogeneidad, estabilidad y reproducibilidad para su posterior procesamiento.

En la fase de caracterización, se llevó a cabo un análisis morfológico mediante técnicas de estereoscopía, a partir del cual se determinaron parámetros como la longitud, el diámetro aparente y la rugosidad superficial de las fibras, se realizaron ensayos mecánicos y físicos conforme a normas estandarizadas de la ASTM, con el objetivo de evaluar el impacto que tiene la adición de diferentes fibras vegetales en diferentes proporciones en las propiedades del material. Finalmente se llevó a cabo una simulación 3D con las propiedades caracterizadas en la investigación.

**Figura 1.** Esquema metodológico empleado en la investigación

### 3.1 Adecuación de materias primas

Ambos refuerzos lignocelulósicos fueron sometidos a un acondicionamiento previo que inició con un corte manual hasta longitudes aproximadas de 1 cm, con el objetivo de facilitar el proceso de molienda posterior en un molino de cuchillas tipo Thomas Wiley. Finalmente, las fibras se secaron en estufa a 60 °C durante 7 horas, con el fin de eliminar la humedad residual y garantizar su estabilidad higroscópica antes de su incorporación al material compuesto.

### 3.2 Planteamiento del diseño experimental

El trabajo se desarrolló a partir de un diseño experimental que consideró dos variables independientes. La primera correspondió al tipo de refuerzo lignocelulósico, evaluado en dos niveles: fibra de fique y fibra de piña. La segunda variable fue la fracción másica del refuerzo, establecida en cinco niveles comprendidos entre el 0 % y el 80 %, con incrementos de 20%.

Posteriormente, para analizar la influencia de estas variables de estudio en el comportamiento del WPC, se realizaron ensayos mecánicos de flexión, tensión y dureza Shore D. De manera complementaria, se evaluaron propiedades físicas a través de pruebas de densidad aparente, mediciones del ángulo de contacto y el análisis de la absorción de humedad.

### **3.3 Conformado de los WPC**

Los WPC se conformaron a partir de dos sistemas binarios de refuerzo: (1) fibra de fique/PEAD/PE-g-MA y (2) fibra de piña/PEAD/PE-g-MA. Para cada uno de estos sistemas se definieron cinco formulaciones, obtenidas mediante la variación de la fracción másica del refuerzo lignocelulósico en niveles de 0 %, 20 %, 40 %, 60 % y 80 % con respecto a la masa total del compuesto. El proceso de mezclado se llevó a cabo en un reómetro de torque, con el propósito de garantizar una dispersión homogénea de las fases constituyentes. Posteriormente, el material se sometió a un proceso de prensado térmico, con el fin de obtener láminas sólidas. Finalmente, la forma final de las probetas se efectuó mediante maquinado por corte láser de CO<sub>2</sub> (modelo 1390), lo que permitió asegurar la precisión dimensional y el cumplimiento de las formas requeridas para cada ensayo.

### **3.4 Caracterización de los WPC**

#### **3.4.1 Ensayos mecánicos**

##### **3.4.1.1. Tensión**

Desarrollado bajo la norma ASTM D638-22 empleando probetas tipo V y una velocidad de ensayo de 1 mm/min. Las pruebas se realizaron en una máquina universal Tinius Olsen H25KS en al menos tres repeticiones por cada composición. Con los resultados de este ensayo se calculó la resistencia a tensión, el módulo de elasticidad y la deformación máxima de los WPC. Para cada propiedad se presentan los valores promedio con su respectiva desviación estándar.

##### **3.4.1.2 Flexión**

Ejecutado según la norma ASTM D790-17 (Procedimiento A) en una máquina de ensayos universales Instron 3366 con una celda de carga de 1 KN. Se determinó la distancia entre apoyos

y la velocidad de carga para ensayar las muestras hasta su fractura. A partir de los datos, se calcularon el esfuerzo de flexión y el módulo de elasticidad tangente del material compuesto. Para cada propiedad se presentan los valores promedio con su respectiva desviación estándar.

### **3.4.1.3 Dureza**

Realizado conforme a la norma ASTM D785-23. Se empleó un durómetro Shore con penetrador de acero sobre probetas planas de espesores homogéneos. Se efectuaron al menos cinco mediciones en distintos puntos de la superficie y se reporta los valores promedio con su respectiva desviación estándar.

## **3.4.2. Ensayos físicos**

### **3.4.2.1. Rugosidad**

Evaluada con un microscopio digital HIROX KH-7700 después del acondicionamiento. Se analizaron tres muestras por fibra fijadas con cinta doble faz para asegurar la estabilidad durante la observación. El objetivo fue obtener mediciones representativas de la textura superficial de las fibras de fique y piña.

### **3.4.2.2. Longitud y espesor de fibra**

La caracterización dimensional se realizó mediante un microscopio digital HIROX KH-7700, el análisis de imágenes digitales utilizando el software Image-Pro-Plus. Este sistema permitió analizar cerca de 200 fibras con precisión el diámetro y la longitud de fibras de fique y piña, con las cuales se realizó un histograma para mostrar la tendencia morfológica de las mismas.

### 3.4.2.3. Densidad

Realizada conforme a la norma ASTM D792-20 mediante el principio de desplazamiento de gas utilizando un picnómetro de helio Ultracyc 5000 marca Anton Paar. Se ejecutaron cinco repeticiones por formulación para garantizar la representatividad estadística de los valores promedio y su desviación estándar.

### 3.4.2.4. Ángulo de contacto

Basado en la norma ASTM D7334-08(2022) mediante la técnica de gota sésil con agua ionizada (5µL). Se utilizó el software KRUSS ADVANCE y un equipo Drop Shape Analyzer para capturar imágenes en los primeros 30 segundos tras el depósito. El procedimiento se repitió por triplicado para cada formulación analizada.

### 3.4.2.5. Absorción de humedad

Bajo la norma ASTM D570-20, las muestras se acondicionaron a 60 °C durante 12 horas, y se sumergieron en agua destilada a 23 °C por 24 horas. Se registró la masa inicial ( $W_0$ ) y final ( $W_1$ ) en una balanza de precisión, el ensayo se llevó a cabo por triplicado. El cálculo del % de absorción permitió determinar la susceptibilidad higroscópica de los compuestos frente al agua, tal que:

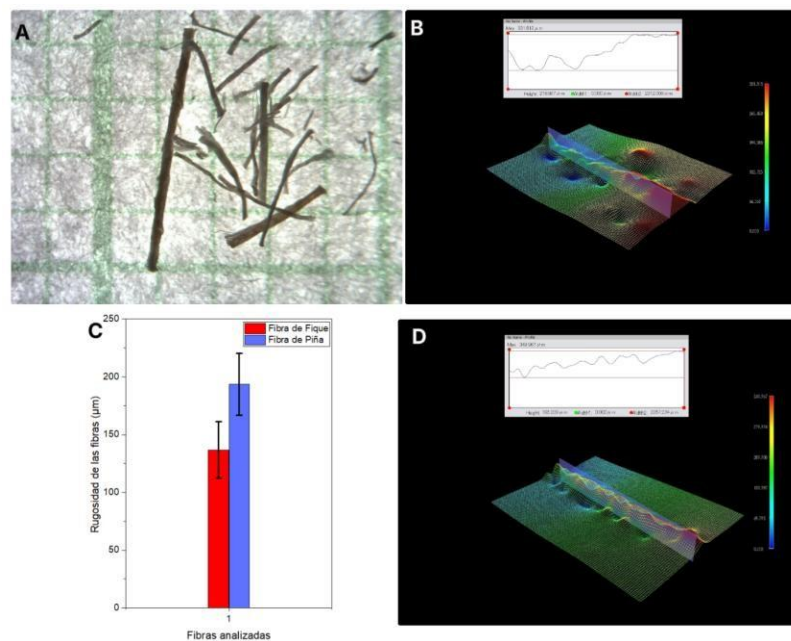
$$\text{Aumento de peso (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100$$

## 4. Resultados y Discusión

### 4.1 Caracterización morfológica

**Figura 2.** Resultados de los ensayos morfológicos

(A) Caracterización dimensional de las fibras de piña y fique, (B) reconstrucción 3D de la rugosidad superficial de la fibra de piña, (C) Caracterización de rugosidad superficial, (D) reconstrucción 3D de la rugosidad superficial de la fibra de fique



El análisis de las fibras evidenció que la fibra de piña presenta una superficie intrínsecamente más irregular y rugosa en comparación con la fibra de fique. Tras la adecuación de materias primas, se observó un incremento de la rugosidad en ambos tipos de fibra; no obstante, la fibra de piña conservó una topografía superficial más rugosa.

Esta rugosidad, como se observa en la figura 2B, tiene una incidencia directa sobre el comportamiento mecánico del material compuesto, ya que una superficie más rugosa favorece el

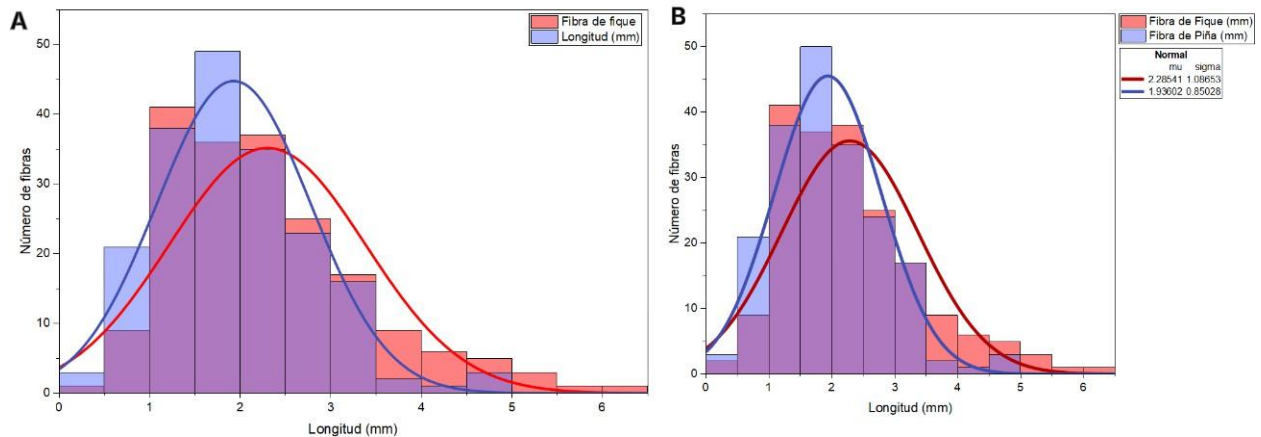
anclaje mecánico y permite una transferencia de esfuerzos más eficiente desde la matriz de PEAD hacia el refuerzo.

El análisis de la rugosidad superficial, detallado en la Figura 2C, evidencia diferencias significativas tanto en la naturaleza intrínseca de los refuerzos como en su respuesta morfológica tras los tratamientos de corte y molienda. La fibra de piña se caracteriza por una mayor presencia de protuberancias naturales, como se observa en la Figura 2B, esta tendencia se traduce en valores de rugosidad cuantitativamente superiores para la fibra de piña ( $193,5 \mu\text{m}$ ) frente a la de fique ( $136,7 \mu\text{m}$ ). Este incremento generalizado en la rugosidad de ambos refuerzos es posible que sea atribuido a la naturaleza diferente de las fibras.

La mayor rugosidad observada en las fibras de piña guarda una relación directa con el desempeño mecánico superior registrado en los ensayos de flexión y dureza previamente discutidos. Una superficie con mayores irregularidades facilita una transferencia de esfuerzos más eficiente, validando la premisa de que la fibra de piña posee una mayor eficiencia de refuerzo debido a su topografía superficial favorable (Venkatesh, 2024). Estos valores de rugosidad superan a los reportados por Kumar et al. (2025) para fibras de coco tratadas, cuya superficie suele presentar una topografía más regular que limita parcialmente la adhesión mecánica en comparación con las fibras de hoja como la piña.

**Figura 3.** Resultado del análisis de la longitud y espesor de la fibra.

(A) Distribución de la longitud de las fibras analizadas, (B) Distribución del espesor de las fibras analizadas.



El análisis morfométrico de los refuerzos, presentado en la Figura 3A, confirma la naturaleza intrínsecamente heterogénea de las fibras naturales, característica que influye de manera directa en la eficiencia del refuerzo dentro de la matriz de PEAD. En relación con la distribución de longitudes, mostrada en la Figura 3A, la fibra de piña evidenció una mayor frecuencia de filamentos de mayor longitud en comparación con la fibra de fique, con una longitud media superior que resulta favorable para el desempeño mecánico del material compuesto. Esta característica es particularmente relevante, ya que una mayor longitud efectiva permite superar la longitud crítica necesaria para la transferencia de carga, lo que se traduce en una optimización significativa del módulo y de la resistencia a la flexión (Thamaon y Rudeiros-Fernández, 2018). En conjunto, estos resultados indican que la fibra de piña no solo presenta una superficie más rugosa, sino también una relación de aspecto más favorable, lo que justifica su desempeño mecánico superior frente a la fibra de fique.

En cuanto al espesor de las fibras, presentado en la Figura 3B, se observó una dispersión característica de los materiales lignocelulósicos, cuyas dimensiones están fuertemente

influenciadas por factores biológicos y por las condiciones del proceso de extracción. La fibra de piña mostró una mayor variabilidad dimensional, así como la presencia de eventos puntuales asociados a mayores espesores, en comparación con la fibra de fique, la cual presentó una distribución más concentrada en rangos intermedios. De acuerdo con Basiji et al. (2025), el espesor de la fibra constituye un parámetro crítico en la micromecánica de los materiales compuestos, ya que fibras con diámetros menores tienden a presentar un menor número de defectos estructurales y una mayor área superficial específica, lo que favorece la adhesión interfacial.

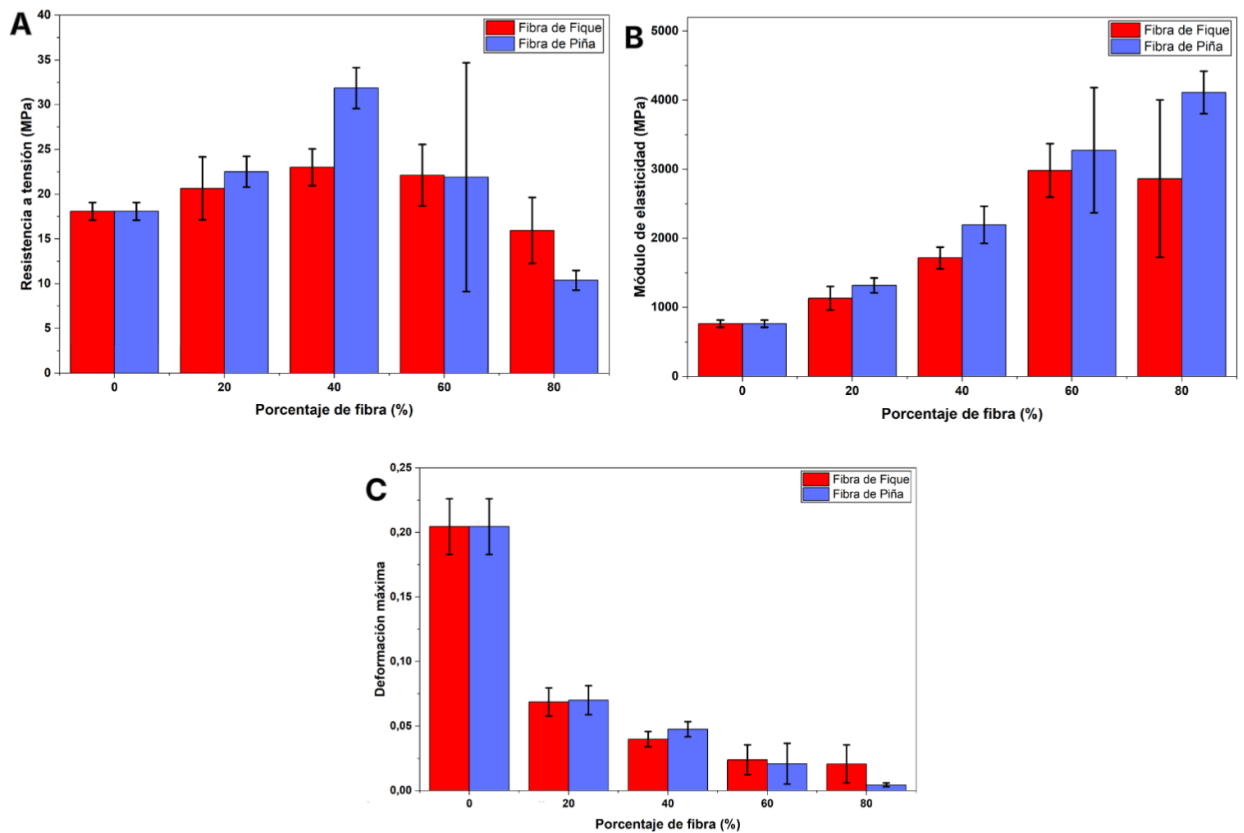
La amplia dispersión dimensional observada en ambos tipos de refuerzo pone de manifiesto los desafíos asociados a la procesabilidad de sistemas con altas fracciones de carga. La presencia de fibras con dimensiones heterogéneas puede favorecer la formación de aglomerados y la aparición de zonas de debilidad estructural, especialmente cuando el volumen de refuerzo excede la capacidad de mojado de la matriz polimérica (Hachaichi et al., 2022). En este sentido, los resultados morfométricos obtenidos complementan de manera coherente los análisis de rugosidad superficial y de comportamiento mecánico, confirmando que la superioridad de la fibra de piña se sustenta en la combinación de una topografía superficial más agresiva y una distribución de longitudes que favorece un anclaje físico más eficiente dentro del PEAD reciclado.

## 4.1 Ensayos mecánicos

### 4.1.1 Tensión

**Figura 4.** Resultados del ensayo de tensión.

(A) resistencia a la tensión, (B) Módulo de elasticidad y (C) Deformación máxima, en función del porcentaje de fibra incorporado.



El análisis de las propiedades mecánicas de los compuestos de PEAD reciclado reforzados con fibras naturales revela algunas tendencias relacionan la interacción fibra-matriz y con el contenido de refuerzo incorporado. En lo referente a la resistencia a la tensión, presentada en la Figura 4A, se identificó un comportamiento de tipo parabólico. La incorporación de la fibra de piña en un 40% elevó la resistencia de la matriz de PEAD reciclado hasta 32 MPa, alcanzandose un incremento del 76,3% en dicha propiedad. La fibra de fiquel exhibió un menor incremento

comparado con la fibra de piña, generando un valor máximo de resistencia a tensión de 23 MPa, lo que presenta un incremento del 27,2%.

El desempeño superior observado para la fibra de piña, en comparación con la de fique, concuerda con lo reportado por (Ramful, 2024) quien atribuye este incremento en la resistencia a una mayor compatibilidad y a una interacción interfacial más eficiente con el agente de acople PE-g-MA. En este contexto, la morfología superficial más rugosa de la fibra de piña, analizada previamente, favorece un anclaje mecánico más efectivo en relación con la fibra de fique, contribuyendo así a una transferencia de esfuerzos más eficiente comparado con la fibra de fique.

Porcentajes de fibra superiores al 40 %, mostraron una disminución considerable en la resistencia a la tensión, al 60 % de carga, la resistencia del compuesto reforzado con fibra de piña disminuyó hasta valores cercanos a 28 MPa, mientras que al 80 % de carga se observó una reducción en la resistencia a tensión con valores de 16 MPa, aproximándose nuevamente a la resistencia característica del PEAD reciclado

Esta disminución en el desempeño mecánico a altas concentraciones de fibra es consistente con los resultados reportados por Tumpal Ojahan Rajagukguk et al., (2024) quienes señalan que, en compuestos de PEAD-fibra de piña, un incremento excesivo de la fracción de refuerzo (por encima del 40–50 %) favorece la formación de aglomerados fibrosos y una humectación deficiente por parte de la matriz polimérica. De acuerdo con estos autores, dichos aglomerados actúan como concentradores de esfuerzos, promoviendo la iniciación temprana de grietas antes de que el refuerzo alcance su capacidad teórica de carga.

En cuanto al módulo de elasticidad, presentado en la Figura 4B, se observó un incremento progresivo en función del contenido de fibra, alcanzando valores superiores a 4000 MPa para los

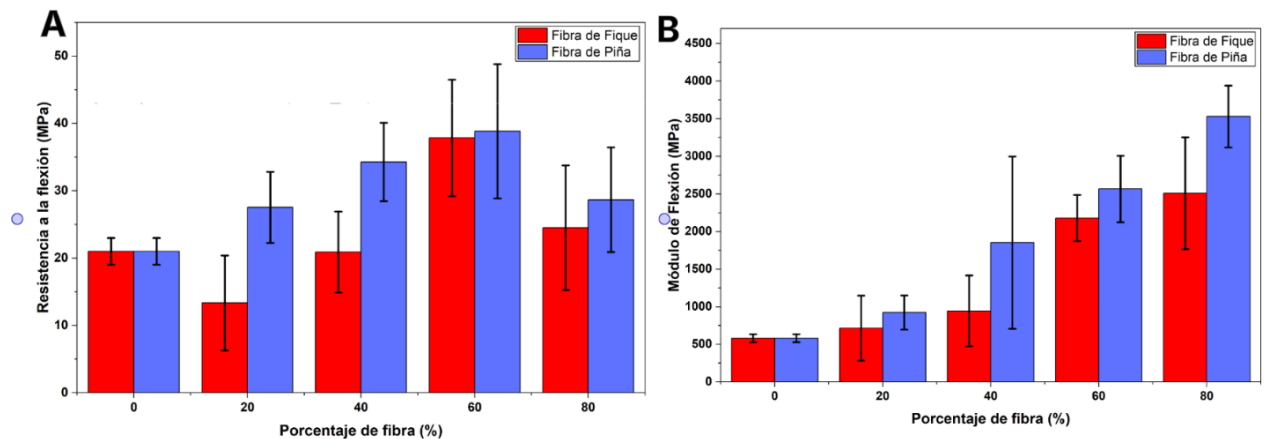
compuestos reforzados con fibra de piña al 80 %. Este aumento sostenido en la rigidez del material concuerda con otros estudios, como el de García et al., (2024), en el que demuestran una relación directa entre el contenido de fibra y el módulo de Young en materiales compuestos. Sin embargo, la dispersión de los datos, reflejada en el aumento de la desviación estándar para los mayores contenidos de refuerzo (60 % y 80 %), sugiere la presencia de heterogeneidades en el material, probablemente asociadas a la formación de aglomerados y a una humectación incompleta de las fibras por la matriz, tal como advierten Hao et al. (2021) al analizar los mecanismos de adhesión interfacial en compuestos con altas fracciones de carga.

Finalmente, en lo referente a la ductilidad, la disminución considerable en la deformación máxima observada en la Figura 3C, que pasó de valores cercanos a 0,20 en la matriz sin carga a valores inferiores a 0,07 con la adición del 20 % de fibra— evidencia una transición hacia un comportamiento mecánico más frágil. Este fenómeno es característico de matrices termoplásticas reforzadas con fibras, en las que la elevada rigidez del refuerzo restringe la movilidad de las cadenas poliméricas, limitando así la capacidad de deformación plástica del compuesto, como ha sido ampliamente documentado por (Roumeli et al., 2012).

### 4.1.2 Flexión

**Figura 5.** Resultados del ensayo de flexión.

(A) Resistencia a la flexión y (B) Módulo de elasticidad, en función del porcentaje de fibra incorporado.



Los resultados del ensayo de flexión, mostrados en la Figura 5, evidencian que la incorporación de refuerzos lignocelulósicos modifica de manera significativa la respuesta mecánica del PEAD. Tomando como referencia la matriz polimérica sin carga, la cual presenta una resistencia a la flexión de 21 MPa y un módulo de 580 MPa, se observa un efecto reforzante claramente diferenciado en función del tipo de fibra empleada y de su fracción másica.

La resistencia a la flexión exhibe un comportamiento no lineal, tal como se aprecia en la Figura 4A, en el que la calidad de la interacción fibra–matriz resulta determinante. En el caso de la fibra de figue, se observa un efecto a bajas concentraciones de refuerzo: con un 20 % de carga, la resistencia del material disminuye hasta aproximadamente 14 MPa, situándose por debajo del valor correspondiente a la matriz pura (21 MPa). Este comportamiento sugiere una deficiente relación entre la fibra y el PEAD, o bien una transferencia de esfuerzos deficiente cuando el contenido de refuerzo es bajo. En contraste, la incorporación de fibra de piña genera un incremento de la resistencia desde la primera adición, alcanzando valores cercanos a 28 MPa.

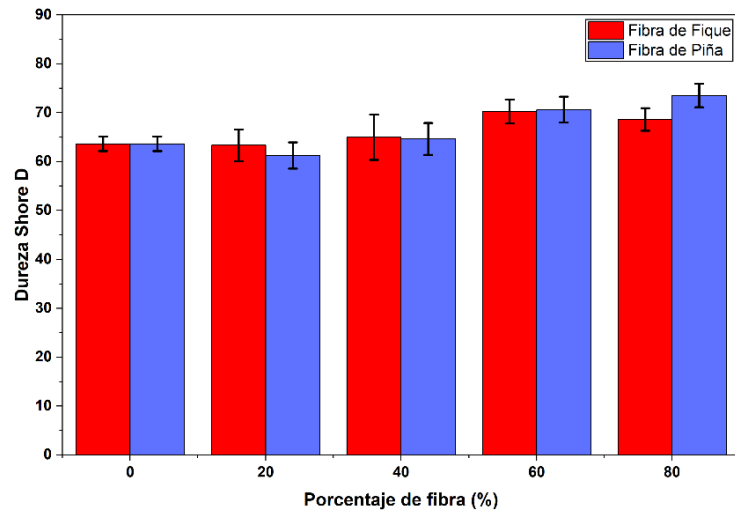
Para ambos tipos de refuerzo, el máximo desempeño mecánico se alcanza al 60 % de carga, con resistencias a la flexión de aproximadamente 39 MPa para la fibra de piña y 38 MPa para la fibra de fique. Estos valores superan el límite de 32,5 MPa reportado para compuestos de PEAD reforzados con fibra de coco por (Kumar et al., 2022) Sin embargo, Con adiciones superiores al 60% de ambas fibras, se presenta una disminución en la resistencia a la flexión en ambos materiales. Este comportamiento es consistente con lo descrito por da (da Silva et al., 2025), quienes señalan que un volumen excesivo de fibra dificulta el mojado completo (wetting) por parte del PEAD, lo que favorece la aparición de defectos interfaciales y puntos de falla prematura.

El módulo de flexión, se observa un incremento sostenido en ambos compuestos WPC, tal como se presenta en la Figura 4B, lo que confirma que la adición de fibras lignocelulósicas incrementa la rigidez del material al restringir la movilidad de las cadenas poliméricas (Kieffer y Santana, 2025). A lo largo de todo el rango de composiciones evaluadas, la fibra de piña mostró una mayor capacidad de refuerzo, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 3550 MPa con porcentajes del 80 % en el compuesto. En comparación, la fibra de fique alcanzó un módulo de flexión cercano a 2550 MPa en el mismo nivel de refuerzo. Ambos resultados superan el desempeño de compuestos de PEAD reforzados con fibra de coco reportados por Kumar et al. (2025), quienes sitúan el módulo máximo en torno a los 2100 MPa. Estos resultados sugieren que la fibra de piña presenta un mayor potencial para aplicaciones que demandan una elevada rigidez estructural, en concordancia con lo señalado por Jirón et al., (2022)

### 4.1.3 Dureza

**Figura 6.** Resultados del ensayo de dureza.

Dureza Shore D, en función del porcentaje de fibra incorporado.



Los resultados de la evaluación de la dureza Shore D, presentados en la Figura 6, ponen de manifiesto un comportamiento diferenciado en la resistencia a la indentación superficial tras la incorporación de refuerzos lignocelulósicos. Tomando como referencia el PEAD reciclado, con un valor promedio de 64 Shore D, se observa que la adición de fibras naturales genera un efecto reforzante que es más marcado a partir de una fracción de carga del 60 %.

La fibra de piña exhibió la mayor efectividad como refuerzo a elevadas concentraciones. Si bien al 20 % de carga se registró una ligera disminución respecto a la matriz, el material alcanzó un valor máximo de 74 Shore D al 80 % de refuerzo. Este incremento se atribuye al alto contenido de celulosa de la fibra de piña, el cual contribuye al aumento de la densidad superficial del compuesto y a la reducción de la flexibilidad de la matriz polimérica (Venkatesh, 2024). Por su parte, la fibra de fique mostró una tendencia ascendente similar hasta el 60 % de carga, alcanzando

valores cercanos a 70 Shore D; sin embargo, al incrementarse la fracción de refuerzo hasta el 80 %, se observó un leve descenso, con valores alrededor de 68 Shore D.

Esta divergencia en el comportamiento sugiere que la morfología de la fibra de piña favorece un empaquetamiento más compacto y una distribución más uniforme del refuerzo en condiciones de alta carga, en comparación con la fibra de fique.

En concentraciones bajas de refuerzo (20 % y 40 %), ninguna de las fibras produjo variaciones significativas con respecto a la matriz polimérica, lo que indica que la influencia de los refuerzos lignocelulósicos sobre la resistencia superficial depende de la formación de una red fibrosa lo suficientemente densa como para oponerse de manera efectiva a la penetración del indentador durante la medición de dureza (Binti Mustapha et al., 2021). Al contrastar estos resultados con la literatura, se observa que el desempeño del compuesto reforzado con fibra de piña, que alcanza 74 Shore D, supera los valores reportados por Kumar et al., 2022) para compuestos de PEAD reforzados con fibra de coco, los cuales se sitúan en el rango de 68 a 71 Shore D.

A pesar de que algunos autores, como (Hao et al., 2021) advierten sobre una posible disminución de la dureza en contenidos de refuerzo superiores al 40 %, atribuida a la formación de porosidad y aglomerados fibrosos, los resultados experimentales obtenidos en este estudio mantienen una tendencia creciente hasta el 80 %, particularmente en el caso de la fibra de piña.

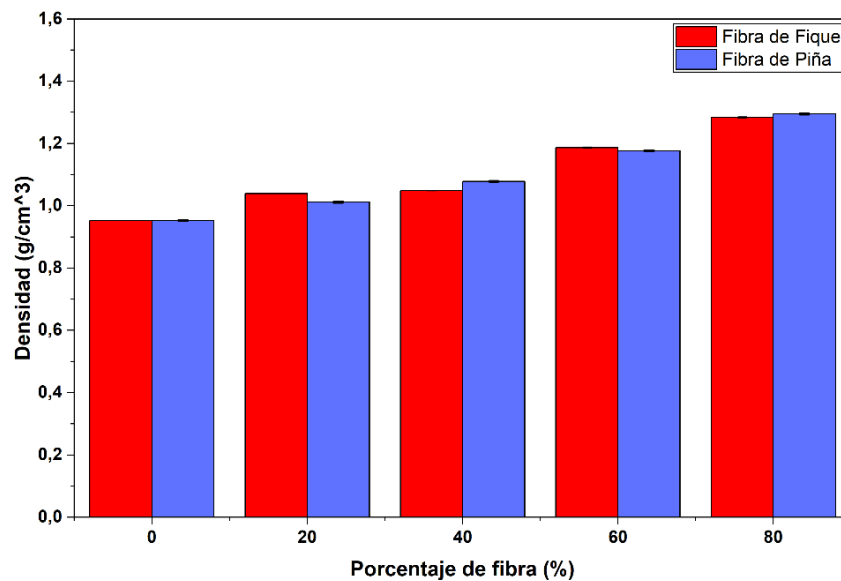
Este comportamiento sugiere que la dureza superficial es menos sensible a la presencia de defectos estructurales internos en comparación con otras propiedades mecánicas, como la resistencia a la flexión. En consecuencia, se observa un efecto de upscaling de la rigidez superficial, en el cual la elevada fracción volumétrica de fibra compensa las limitaciones mecánicas de la matriz polimérica, manteniendo un nivel de homogeneidad aceptable, tal como lo

indica la dispersión moderada observada en las mediciones experimentales (Königsberger et al., 2024).

## 4.2 Ensayos físicos

### 4.2.1 Densidad

**Figura 7.** Resultados del ensayo de densidad, en función del porcentaje de fibra incorporado



El ensayo de densidad, presentado en la Figura 8, evidenció un incremento lineal y directamente proporcional al contenido de refuerzo, con una evolución desde un valor inicial de  $0,95 \text{ g/cm}^3$  para el PEAD reciclado hasta  $1,28 \text{ g/cm}^3$  con el 80 % de carga. Este aumento sostenido se explica principalmente por la incorporación de fibras lignocelulósicas, las cuales presentan una densidad intrínseca superior a la de la matriz termoplástica. En este sentido (Jubinvill et al., 2023) reportan que, en compuestos elaborados a partir de PEAD reciclado, la densidad aumenta de manera predecible a medida que la fracción de fibra reemplaza el volumen de la matriz polimérica. En sistemas comparables reforzados con fibras naturales, se han documentado valores de densidad

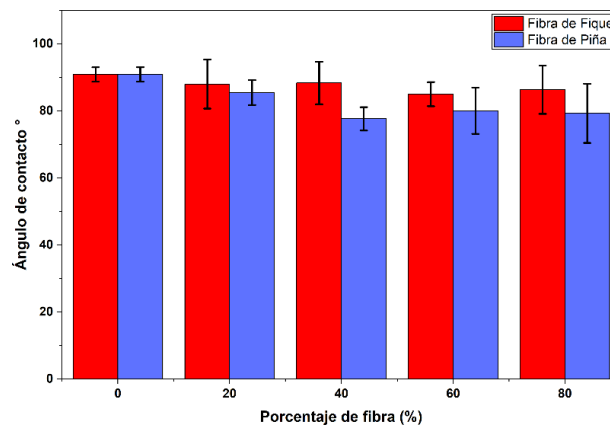
finales comprendidos entre 1,15 y 1,40 g/cm<sup>3</sup>, dependiendo en gran medida de la eficiencia de compactación alcanzada durante el proceso de manufactura.

De acuerdo con Gokarneshan et al., (2021) la disminución de la porosidad en biocompuestos constituye un indicador clave de una interacción fibra–matriz efectiva, especialmente cuando esta se encuentra mediada por agentes de acople como el PE-g-MA, permitiendo alcanzar densidades reales equivalentes al 92–95 % de la densidad teórica del material.

A diferencia de lo reportado con frecuencia en la literatura, donde se describe un incremento exponencial de la porosidad en compuestos con altas fracciones de refuerzo, y en particular, donde Li et al., (2024) señalan que contenidos de fibra superiores al 50 % suelen inducir niveles de porosidad del orden del 10 % al 15 %, la tendencia creciente y estable observada hasta el 80 % de carga en este estudio sugiere que el método de procesamiento empleado resultó eficaz para minimizar la formación de aire atrapado y defectos internos.

#### 4.2.2 Ángulo de contacto

**Figura 8.** Resultados del ensayo de ángulo de contacto en función del porcentaje de fibra incorporado

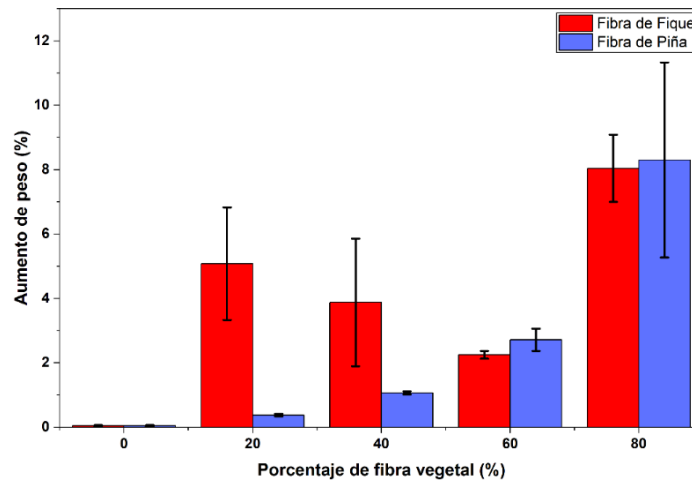


La caracterización de la mojabilidad mediante el ángulo de contacto, detallada en la Figura 9, reveló una transición significativa en la naturaleza superficial del material. La matriz de PEAD reciclado mostró un comportamiento hidrofóbico característico de los polímeros, con un ángulo de contacto de  $91^\circ$ , el cual experimentó una tendencia decreciente conforme se incrementó el contenido de refuerzo. Esta transición hacia una mayor hidrofiliidad alcanzó valores mínimos de  $78^\circ$  para los compuestos reforzados con fibra de piña, mientras que la fibra de fique mantuvo ángulos ligeramente superiores de hasta  $83.7^\circ$ . Este comportamiento se explica por la exposición de grupos hidroxilo polares intrínsecos en las fibras lignocelulósicas, los cuales elevan la energía superficial y la afinidad por el agua. Según (Dhakal & Dashatan, 2024) la incorporación de refuerzos naturales en matrices termoplásticas puede reducir el ángulo de contacto en un rango de  $10^\circ$  a  $15^\circ$  respecto a la matriz pura, dependiendo del grado de tratamiento químico y la exposición de la celulosa.

La reducción más pronunciada observada en los ángulos de la fibra de piña guarda una estrecha relación con su mayor rugosidad y morfología irregular; una superficie con mayores irregularidades y un área de exposición de celulosa más extensa facilita el esparcimiento de la gota sobre el material.

### 4.2.3 Absorción de humedad

**Figura 9.** Resultados del ensayo de absorción de humedad, en función del porcentaje de fibra incorporado



El análisis de la absorción de humedad, detallado en la Figura 10, reveló una dependencia directa y proporcional entre la fracción volumétrica de refuerzo y la capacidad de retención de agua del material. Mientras que la matriz de PEAD reciclado mostró un comportamiento hidrofóbico con una ganancia de masa casi nula (menor al 0.1%), los compuestos experimentaron un incremento significativo, alcanzando niveles de absorción superiores al 8% al llegar al 80% de carga. Este fenómeno es intrínseco a la naturaleza de las fibras vegetales, cuyo carácter hidrofílico y abundancia de grupos hidroxilo promueven la formación de puentes de hidrógeno con las moléculas de agua, facilitando su difusión a través de la matriz polimérica. Según (Ichim et al., 2024) este tipo de refuerzos naturales pueden presentar una capacidad de absorción de agua de entre el 7% y el 12% en compuestos con alta carga, dependiendo del grado de exposición de la celulosa.

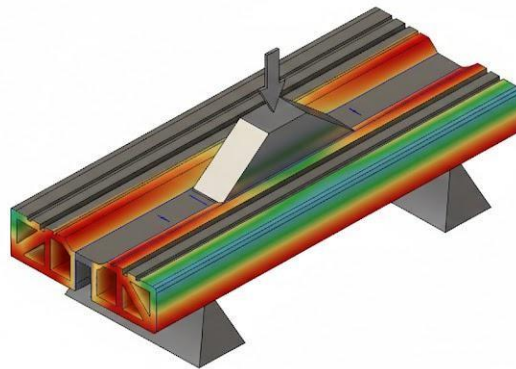
En la comparativa por tipo de refuerzo, se observó que la fibra de piña mantuvo un incremento de peso más gradual y controlado hasta el 60% de carga (alcanzando aproximadamente

un 2.7%). Este comportamiento sugiere una mejor encapsulación del refuerzo por parte de la matriz en comparación con la fibra de fique, la cual presentó fluctuaciones y valores más elevados en concentraciones bajas. No obstante, la marcada dispersión de los datos en el nivel del 80% indica la presencia de microfisuras e interconectividad entre las fibras, creando canales de transporte capilar que aceleran la saturación del material. De acuerdo con Bhattacharjee & Bajwa, (2018), una entrada masiva de humedad superior al 5% en peso no solo altera la densidad, sino que induce el hinchamiento de las fibras naturales (llegando a expandirse entre un 10% y 20% en volumen), generando tensiones internas que debilitan severamente la interfaz fibra-matriz.

### 4.3 Simulación 3D.

**Figura 10.** Simulación realizada a un perfil de WPC

Simulación realizada, en función del mejor desempeño de las propiedades del WPC



La simulación tridimensional se llevó a cabo en el software Autodesk Fusion 360 mediante la generación del modelo geométrico del perfil estructural de madera plástica, considerando sus dimensiones reales. Al modelo se le asignaron las propiedades mecánicas correspondientes a la formulación seleccionada, tales como un módulo de elasticidad de aproximadamente 4 000 MPa, un coeficiente de Poisson de 0,35 y una resistencia a la flexión cercana a 30 MPa, obtenidas a

partir de los ensayos experimentales. Posteriormente, se definieron las condiciones de frontera representativas del estado de servicio, fijando los apoyos en los extremos del perfil y aplicando una carga vertical concentrada de 500 N en la zona central para simular un ensayo de flexión en tres puntos. Finalmente, se ejecutó un análisis estático lineal que permitió obtener la distribución de esfuerzos de Von Mises y las deformaciones máximas, evidenciando concentraciones de esfuerzo en las fibras externas del perfil y desplazamientos acordes con el comportamiento elástico del material, mostrando una adecuada coherencia con los resultados experimentales obtenidos..

## 6. Conclusiones

En esta investigación se desarrollaron compuestos de madera plástica a partir de PEAD reciclado y fibras lignocelulósicas de piña y fique de la región, demostrando su viabilidad como alternativa para el aprovechamiento de residuos agroindustriales y plásticos. Los resultados evidenciaron que la incorporación de fibras modifica de manera significativa el comportamiento mecánico del material, destacándose un aumento notable en la rigidez y la resistencia a la tracción, con un valor máximo de 32 MPa al 40 % de fibra de piña y un incremento del módulo de elasticidad superior al 400 % respecto al PEAD reciclado puro. No obstante, contenidos de refuerzo elevados generaron una disminución de la resistencia, asociada a la formación de aglomerados y a una humectación incompleta de la fibra. Asimismo, se observó una reducción marcada de la ductilidad del material desde bajas fracciones de refuerzo, evidenciando una transición hacia un comportamiento más frágil, característica propia de compuestos termoplásticos altamente reforzados y que condiciona su aplicación en componentes que requieran alta deformación antes de la falla.

El ángulo de contacto disminuyó progresivamente con el incremento del contenido de fibra, pasando de 91° en el PEAD puro a valores entre 78° y 80° en compuestos con fibra de piña, lo que

indica una transición de superficies predominantemente hidrofóbicas hacia un comportamiento más hidrofílico. Esta tendencia se atribuye a la exposición de grupos hidroxilo propios de la celulosa y a la mayor rugosidad superficial del refuerzo vegetal

De forma coherente, la absorción de humedad mostró un aumento significativo con la fracción de fibra, desde valores prácticamente despreciables en la matriz pura (<0.1%) hasta niveles superiores al 8% al 80% de refuerzo. Este comportamiento confirma que, aunque el PEAD reciclado actúa como barrera frente al agua, su capacidad de encapsulación se ve comprometida en sistemas altamente cargados, lo que incrementa la susceptibilidad higroscópica del compuesto

La caracterización física evidenció que el incremento del contenido de fibra lignocelulósica influye de manera directa en el comportamiento del compuesto, generando un aumento progresivo de la densidad y de la susceptibilidad higroscópica, junto con una disminución de la hidrofobicidad superficial. En términos generales, la adición de fibras favoreció una mayor compactación del material, pero también promovió la exposición de grupos hidroxilo y una mayor rugosidad superficial, lo que se tradujo en menores ángulos de contacto y mayores niveles de absorción de humedad, especialmente en sistemas con altos contenidos de refuerzo. Estos resultados confirman que, si bien la incorporación de fibras mejora ciertas características físicas del WPC, también limita su estabilidad frente a la humedad, particularmente en formulaciones altamente reforzadas.

El contenido de fibra se identificó como un parámetro determinante en el desempeño global de los compuestos reforzados con fibras de piña y de fique, observándose un comportamiento óptimo en formulaciones intermedias. En ambos sistemas, un contenido cercano al 40 % p/p permitió maximizar la resistencia mecánica manteniendo una adecuada integridad estructural,

mientras que incrementos adicionales del refuerzo condujeron a un aumento sostenido de la rigidez y la densidad, acompañado de una reducción progresiva de la ductilidad y la estabilidad frente a la humedad. En consecuencia, los compuestos con altos contenidos de fibra (60–80 %) presentaron un carácter más rígido y frágil, adecuados para aplicaciones estructurales estáticas, mientras que formulaciones intermedias ofrecieron un mejor equilibrio entre resistencia, rigidez y comportamiento físico, independientemente del tipo de fibra empleada.

La simulación numérica del perfil estructural de madera plástica, realizada en Fusion 360 utilizando la formulación con 80 % de fibra de piña, evidenció un comportamiento mecánico dominado por flexión, con máximas concentraciones de esfuerzo localizadas en las fibras externas del perfil y gradientes significativamente menores en la región central, en concordancia con la teoría clásica de vigas. La distribución continua de esfuerzos observada indica una adecuada capacidad de redistribución sin concentraciones críticas localizadas, reflejando una respuesta estructural estable bajo la carga aplicada. Este comportamiento es consistente con los altos valores de módulo de elasticidad obtenidos experimentalmente para esta formulación, superiores a 4000 MPa, y sugiere que el perfil puede operar de manera segura dentro del régimen elástico, validando el uso del modelo numérico como herramienta para la evaluación del desempeño estructural del material compuesto.

## 7. Referencias bibliográficas

- Almohana, A. I., Abdulwahid, M. Y., Galobardes, I., Mushtaq, J., & Almojil, S. F. (2022). Producing sustainable concrete with plastic waste: A review. *Environmental Challenges*, 9, 100626. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100626>
- Arribasplata-Seguin, A., Quispe-Dominguez, R., Tupia-Anticona, W., & Acosta-Sullcahuamán, J. (2021). Rotational molding parameters of wood-plastic composite materials made of recycled high density polyethylene and wood particles. *Composites Part B: Engineering*, 217, 108876. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108876>
- Ashori, A. (2008). Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresource Technology*, 99(11), 4661–4667. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.043>
- Avallone, I. V., Giraldi, J. D. M. E., & Oliveira, S. V. W. B. de. (2012). Conscious Consumption: a Study on Plastic Bags' Consumers in Brazil. *International Journal of Psychological Studies*, 4(1). <https://doi.org/10.5539/ijps.v4n1p122>
- Belouadah, Z., Toubal, L., Belhaneche-Bensemra, N., & Ati, A. (2021). Characterization of lignocellulosic fiber extracted from *Atriplex halimus* L. plant. *International Journal of Biological Macromolecules*, 168, 806–815. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.142>
- Benthien, J. T., & Thoemen, H. (2012). Effects of raw materials and process parameters on the physical and mechanical properties of flat pressed WPC panels. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(4), 570–576. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.12.028>

- Bhattacharjee, S., & Bajwa, D. S. (2018). Degradation in the mechanical and thermo-mechanical properties of natural fiber filled polymer composites due to recycling. *Construction and Building Materials*, 172, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.010>
- Binti Mustapha, R., Awang, M., & Binti Mustapha, S. N. H. (2021). The Effects of Different Chemical Treatment Methods and Maleic Anhydride Grafted Polyethylene on the Mechanical and Thermal Properties of *Alpinia galanga* Fiber Reinforced Polyethylene Composites. *Materials Science Forum*, 1025, 69–76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1025.69>
- Borysiuk, P., Auriga, R., Wilkowski, J., Auriga, A., Trociński, A., & Seng Hua, L. (2022). A Study on the Susceptibility of PLA Biocomposites to Drilling. *Forests*, 13(11), 1950. <https://doi.org/10.3390/f13111950>
- Bouwmeester, H., Hollman, P. C. H., & Peters, R. J. B. (2015). Potential Health Impact of Environmentally Released Micro- and Nanoplastics in the Human Food Production Chain: Experiences from Nanotoxicology. *Environmental Science & Technology*, 49(15), 8932–8947. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01090>
- Croitoru, C., Varodi, A. M., Timar, M. C., Roata, I. C., Stanciu, E. M., & Pascu, A. (2018). Wood-plastic composites based on HDPE and ionic liquid additives. *Journal of Materials Science*, 53(6), 4132–4143. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1826-7>
- da Silva, T. F., de Almeida Corrêa, R. M., dos Anjos, E. G. R., Marini, J., da Silva, T. F., Anna, M. A. S., de Melo Morgado, G. F., Gonçalves, M., Albers, A. P. F., & Passador, F. R. (2025). Sustainable Polymer Composites: Mechanical Characterization of Recycled High Density Polyethylene With Post-Consumer Diatomaceous Earth. *Polymer Engineering & Science*, 65(10), 5445–5458. <https://doi.org/10.1002/pen.70072>

- Dhakal, H. N., & Dashatan, S. H. (2024). Influence of Fiber/Matrix Interface Properties on the Performance of Fiber Reinforced Polymer Composites. In *Comprehensive Mechanics of Materials* (pp. 22–32). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90646-3.00041-1>
- Elamin, M. A. M., Li, S. X., Osman, Z. A., & Otitoju, T. A. (2020). Preparation and characterization of wood-plastic composite by utilizing a hybrid compatibilizer system. *Industrial Crops and Products*, 154, 112659. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112659>
- Elsheikh, A. H., Panchal, H., Shanmugan, S., Muthuramalingam, T., El-Kassas, Ahmed. M., & Ramesh, B. (2022). Recent progresses in wood-plastic composites: Pre-processing treatments, manufacturing techniques, recyclability and eco-friendly assessment. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100450>
- García, J., Analuiza Hidalgo, B. D., Agualongo Amangandi, W. G., & Remache Sasig, M. X. (2024). Caracterización mecánica de un material compuesto de resina poliéster reforzado con corteza de eucalipto. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 16(2). <https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3353>
- Gokarneshan, N., Pachiyappan, K. M., & Sangeetha, K. (2021). Emerging research trends in new natural fibers—some insights. In *Green Chemistry for Sustainable Textiles* (pp. 205–217). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85204-3.00002-6>
- Gu, F., Guo, J., Zhang, W., Summers, P. A., & Hall, P. (2017). From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of The Total Environment*, 601–602, 1192–1207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.278>
- Gu, F., Hall, P., & Miles, N. J. (2016). Development of composites based on recycled polypropylene for injection moulding automobile parts using hierarchical clustering analysis

- and principal component estimate. *Journal of Cleaner Production*, 137, 632–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.028>
- Gwon, J. G., Lee, S. Y., Chun, S. J., Doh, G. H., & Kim, J. H. (2012). Physical and mechanical properties of wood–plastic composites hybridized with inorganic fillers. *Journal of Composite Materials*, 46(3), 301–309. <https://doi.org/10.1177/0021998311413690>
- Hao, X., Xu, J., Zhou, H., Tang, W., Li, W., Wang, Q., & Ou, R. (2021). Interfacial adhesion mechanisms of ultra-highly filled wood fiber/polyethylene composites using maleic anhydride grafted polyethylene as a compatibilizer. *Materials & Design*, 212, 110182. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110182>
- Huuhilo, T., Martikka, O., Butylina, S., & Kärki, T. (2010). Mineral fillers for wood–plastic composites. *Wood Material Science & Engineering*, 5(1), 34–40. <https://doi.org/10.1080/17480270903582189>
- Hyvärinen, M., Ronkanen, M., & Kärki, T. (2019). The effect of the use of construction and demolition waste on the mechanical and moisture properties of a wood–plastic composite. *Composite Structures*, 210, 321–326. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.063>
- Ichim, M., Muresan, E. I., & Codau, E. (2024). Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites for Furniture Applications. *Polymers*, 16(22), 3113. <https://doi.org/10.3390/polym16223113>
- Jian, B., Mohrmann, S., Li, H., Li, Y., Ashraf, M., Zhou, J., & Zheng, X. (2022). A Review on Flexural Properties of Wood-Plastic Composites. *Polymers*, 14(19), 3942. <https://doi.org/10.3390/polym14193942>
- Jirón, E., Núñez, Y., Rodríguez, K., & Casanova, P. (2022). Tinción y reforzamiento de fibras naturales con PLA a partir de rastrojo de piña como potencial textil. *ESCENA. Revista de Las Artes*, 82(2), 15–46. <https://doi.org/10.15517/es.v82i2.53040>

- Jubenville, D., Chen, G., & Mekonnen, T. H. (2023). Simulated thermo-mechanical recycling of high-density polyethylene for the fabrication of hemp hurd plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*, 211, 110342. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110342>
- Kassab, A., Al Nabhani, D., Mohanty, P., Pannier, C., & Ayoub, G. Y. (2023). Advancing Plastic Recycling: Challenges and Opportunities in the Integration of 3D Printing and Distributed Recycling for a Circular Economy. *Polymers*, 15(19), 3881. <https://doi.org/10.3390/polym15193881>
- Kaymakci, A. (2022). Effect of sepiolite clay nanofibers on physical, mechanical, and thermal properties of wood-plastic nanocomposites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(10), 1647–1659. <https://doi.org/10.1177/0892705720939171>
- Khantimirov, A. G., Abdrakhmanova, L. A., Nizamov, R. K., & Khozin, V. G. (2023). Investigation of properties in nanomodified polyethylene-based wood-polymer composites. *Nanotechnologies in Construction A Scientific Internet-Journal*, 15(2), 110–116. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-110-116>
- Kong, M., Qin, Z., Zhang, P., Xie, G., Wang, H., Wang, J., Guan, F., Yang, W., & Qiu, Z. (2023). Study on modified poplar wood powder/polylactic acid high toughness green 3D printing composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 228, 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.12.197>
- Königsberger, M., Senk, V., Lukacevic, M., Wimmer, M., & Füssl, J. (2024). Micromechanics stiffness upscaling of plant fiber-reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 281, 111571. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111571>

- Kumar, J., Maurya, A. K., Gupta, H. S., Singh, S. P., & Sharma, C. (2022). Development of <scp>eco-friendly bio-composite</scp> by reinforcing pineapple fruit waste crown fiber to <scp>ethylene-propylene</scp> rubber modified polyethylene. *Polymer Composites*, 43(11), 8259–8273. <https://doi.org/10.1002/pc.26997>
- Leu, S.-Y., Yang, T.-H., Lo, S.-F., & Yang, T.-H. (2012). Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood–plastic composites (WPCs). *Construction and Building Materials*, 29, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.013>
- Li, S., Lo, C. K. Y., & Li, L. (2024). A Systematic Literature Review on the Investigation and Application of Vegetable Fibers in Textiles/Apparel and Future Research Agenda. *Journal of Natural Fibers*, 21(1). <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2397692>
- Lv, L. H., Liu, G. Bin, & Zhou, D. (2012). Process and Mechanical Properties of Basalt Fiber/Polylactic Acid Composites. *Applied Mechanics and Materials*, 193–194, 329–332. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.193-194.329>
- MacLeod, M., Arp, H. P. H., Tekman, M. B., & Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution. *Science*, 373(6550), 61–65. <https://doi.org/10.1126/science.abg5433>
- Morreale, M., Scaffaro, R., Maio, A., & La Mantia, F. P. (2008). Effect of adding wood flour to the physical properties of a biodegradable polymer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(3), 503–513. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.12.002>
- Muñoz-Blandón, O., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L., & Ocampo-López, C. (2023). Exploring the Potential of Fique Fiber as a Natural Composite Material: A Comprehensive Characterization Study. *Polymers*, 15(12), 2712. <https://doi.org/10.3390/polym15122712>

- Mwango, A., & Kambole, C. (2019). Engineering Characteristics and Potential Increased Utilisation of Sawdust Composites in Construction—A Review. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 07(03), 59–88. <https://doi.org/10.4236/jbcpr.2019.73005>
- Nayak, S., Khuntia, S. K., Mohanty, S. D., & Mohapatra, J. (2022). Investigation and Fabrication of Thermo-mechanical Properties of *Ceiba Pentandra* Bark Fiber/Poly (Vinyl) Alcohol Composites for Automobile Dash Board and Door Panel Applications. *Journal of Natural Fibers*, 19(2), 450–462. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1745124>
- Nirmal, U., Hashim, J., & Megat Ahmad, M. M. H. (2015). A review on tribological performance of natural fibre polymeric composites. *Tribology International*, 83, 77–104. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.11.003>
- Ozyhar, T., Baradel, F., & Zoppe, J. (2020). Effect of functional mineral additive on processability and material properties of wood-fiber reinforced poly(lactic acid) (PLA) composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 132, 105827. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105827>
- Panthapulakkal, S., Zereshkian, A., & Sain, M. (2006). Preparation and characterization of wheat straw fibers for reinforcing application in injection molded thermoplastic composites. *Bioresource Technology*, 97(2), 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.043>
- Puglia, D., Biagiotti, J., & Kenny, J. M. (2005). A Review on Natural Fibre-Based Composites—Part II. *Journal of Natural Fibers*, 1(3), 23–65. [https://doi.org/10.1300/J395v01n03\\_03](https://doi.org/10.1300/J395v01n03_03)
- Rahmah, N. M., & Owaid, K. M. (2020). Study the Interesting from the plastic Waste to Improve the Physical and Mechanical Properties of the Construction Materials. *IOP Conference*

*Series: Materials Science and Engineering*, 870(1), 012136. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012136>

- Ramful, R. (2024). Mechanical performance and durability attributes of biodegradable natural fibre-reinforced composites—a review. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 19(1), 50. <https://doi.org/10.1186/s40712-024-00198-0>
- Roumeli, E., Papadopoulou, E., Pavlidou, E., Vourlias, G., Bikiaris, D., Paraskevopoulos, K. M., & Chrissafis, K. (2012). Synthesis, characterization and thermal analysis of urea–formaldehyde/nanoSiO<sub>2</sub> resins. *Thermochimica Acta*, 527, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.10.007>
- Seki, Y., Kılınç, A. Ç., Dalmis, R., Atagür, M., Köktaş, S., Göktaş, A. A., Çelik, E., Seydibeyoğlu, M. Ö., & Önay, A. B. (2018). Surface modification of new cellulose fiber extracted from *Conium maculatum* plant: a comparative study. *Cellulose*, 25(6), 3267–3280. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1797-0>
- Shi, H., Li, B., Chen, C., & Jia, Y. (2007). Preparation of HDPE/SEBS -g- MAH and its effect on mechanical properties of HDPE/wood flour composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(5), 3161–3170. <https://doi.org/10.1002/app.25889>
- Sobczak, L., Lang, R. W., & Haider, A. (2012). Polypropylene composites with natural fibers and wood – General mechanical property profiles. *Composites Science and Technology*, 72(5), 550–557. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.12.013>
- Srubar, W. V., Pilla, S., Wright, Z. C., Ryan, C. A., Greene, J. P., Frank, C. W., & Billington, S. L. (2012). Mechanisms and impact of fiber–matrix compatibilization techniques on the material characterization of PHBV/oak wood flour engineered biobased composites.

*Composites Science and Technology*, 72(6), 708–715.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.01.021>

Statista Research Department. (n.d.). *Annual production of plastics worldwide from 1950 to 2022*.

<https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>.

Teles, M. C. A., Altoé, G. R., Amoy Netto, P., Colorado, H., Margem, F. M., & Monteiro, S. N.

(2015). Figue Fiber Tensile Elastic Modulus Dependence with Diameter Using the Weibull

Statistical Analysis. *Materials Research*, 18(suppl 2), 193–199. [https://doi.org/10.1590/1516-](https://doi.org/10.1590/1516-1439.364514)

1439.364514

Teuber, L., Osburg, V.-S., Toporowski, W., Militz, H., & Krause, A. (2016). Wood polymer

composites and their contribution to cascading utilisation. *Journal of Cleaner Production*,

110, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.009>

Toghyani, A., Matthews, S., & Varis, J. (2020). Forming Challenges of Extruded Wood Plastic

Composite Products in a Post-Production Process. *Procedia CIRP*, 93, 502–507.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.156>

Tumpal Ojahan Rajagukguk, Yusup Hendronursito, Anang Anshori, & Kusno Isnugroho. (2024).

The Optimization of Mechanical Properties of HDPE-Pineapple Fiber Composites Using the

Taguchi Method. *THAIES*. [https://ph02.tci-](https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/SciTechAsia/article/view/250009)

[thaijo.org/index.php/SciTechAsia/article/view/250009](https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/SciTechAsia/article/view/250009)

Venkatesh, R. (2024). Significance of TiO<sub>2</sub> on the Mechanical Behavior of High-Density

Polyethylene Nanocomposite Made with Pineapple Fiber. *Journal of The Institution of*

*Engineers (India): Series D*. <https://doi.org/10.1007/s40033-024-00705-9>

- Wang, Y. (2021). Mechanical Properties Effect of Wood-plastic Composite by Basalt Fiber and MAPE. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 726(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/726/1/012005>
- Xian, H. ; Y. H. (2019). Study on Preparation Process of Unsaturated Polyester Resin Composite Reinforced by Banana Fiber. *Periodical Agency of Zhejiang Sci-Tech University*, 27(3), 5–9.
- Xiao, R., Yu, Q., Ye, H., Shi, Y., Sheng, Y., Zhang, M., Nourani, P., & Ge, S. (2023). Visual design of high-density polyethylene into wood plastic composite with multiple desirable features: A promising strategy for plastic waste valorization. *Journal of Building Engineering*, 63, 105445. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105445>
- Zhong, Y. ; B. W. (2017). Micromechanics analysis of high modulus carbon fibers. *School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China*, 34(3), 668–674.
- Zhong, Y., Poloso, T., Hetzer, M., & De Kee, D. (2007). Enhancement of wood/polyethylene composites via compatibilization and incorporation of organoclay particles. *Polymer Engineering & Science*, 47(6), 797–803. <https://doi.org/10.1002/pen.20756>