

Physical and mechanical characterization of extruded plastic lumber for its use in civil constructions

José Daniel López-Chica, Diego Alejandro Ramírez-Cardona, Lesly Biviana Acosta-Agudelo
& Yined Marcela Rivera-Gomez

Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial, Sena Regional Risaralda, Dosquebradas, Colombia, jdlopezc@sena.edu.co, daramirez@sena.edu.co, lbacosta@sena.edu.co, yriverag@sena.edu.co

Received: July 26th, 2024. Received in revised form: January 9th, 2025. Accepted: February 24th, 2025.

Abstract

The research examined the physical and mechanical properties of extruded plastic lumber for civil construction applications. The tests addressed tensile strength, compression, bending, impact and hardness, together with the volumetric density of the material. The results indicated that these plastic woods possess adequate characteristics to resist significant stresses, loads and impacts, standing out for their ability to withstand adverse conditions in structural environments. In addition, it was demonstrated that the use of recycled plastics in their manufacture offers a sustainable and responsible alternative to conventional woods. These findings underscore the potential of extruded plastic lumber as a viable and efficient option for improving durability and sustainability in the construction industry.

Keywords: physical and mechanical properties; tensile; compression; bending; impact; hardness; volumetric density.

Caracterización física y mecánica de maderas plásticas extruidas para su uso en construcciones civiles

Resumen

La investigación examinó las propiedades físicas y mecánicas de las maderas plásticas extruidas para aplicaciones en construcciones civiles. Los ensayos abordaron la resistencia a la tracción, compresión, flexión, impacto y dureza, junto con la densidad volumétrica del material. Los resultados indicaron que estas maderas plásticas poseen características mecánicas para resistir tensiones, cargas e impactos significativos, destacándose por su capacidad para soportar condiciones adversas en entornos estructurales. Además, se demostró mediante aplicaciones que el uso de plásticos reciclados en su fabricación ofrece una alternativa sostenible y responsable a las maderas convencionales. Los hallazgos cuantitativos referentes a las propiedades físicas y mecánicas subrayan el potencial de las maderas plásticas extruidas como una opción viable y eficiente para mejorar la durabilidad y la sostenibilidad en la industria de la construcción.

Palabras clave: propiedades físicas y mecánicas; tracción; compresión; flexión; impacto; dureza; densidad volumétrica.

1 Introducción

1.1 Contexto y relevancia ambiental

En la actualidad, una de las principales preocupaciones en el ámbito de la investigación es la mitigación del impacto ambiental causado por la acumulación de residuos no biodegradables, como los plásticos, que pueden tardar entre 150 y 400 años en descomponerse, así como otros materiales sintéticos y neumáticos [1]. Este problema ha

impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles en diversas disciplinas.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, el 85% de los residuos que llegan a los océanos son plásticos, y manifiesta que para 2040 se triplicarán los volúmenes de residuos con una cifra de entre 23 y 37 millones de toneladas [2]. Estos residuos, generados diariamente, representan una grave amenaza para el medio ambiente, contribuyendo a problemas como la proliferación de plagas, el calentamiento global, el efecto invernadero y la propagación de enfermedades.

El uso excesivo de recursos no renovables ha llevado a la comunidad científica a investigar formas de reutilizar estos materiales, buscando obtener resultados positivos en su reaprovechamiento.

En nuestro país, el desarrollo de materiales nuevos derivados de plásticos reciclados se está consolidando como una alternativa ventajosa, con el potencial de ganar terreno en el mercado de la construcción sostenible y amigable con el medio ambiente. Investigaciones internacionales han mostrado que las maderas plásticas, fabricadas exclusivamente a partir de plásticos reciclados como bolsas de basura, mangueras, cajas plásticas y residuos de industrias de envasado, ofrecen numerosas ventajas. Estas incluyen alta resistencia mecánica, durabilidad ante condiciones ambientales adversas y resistencia a plagas, posicionándolas como un excelente sustituto de la madera tradicional.

No obstante, uno de los retos más significativos para la adopción de estos productos radica en cumplir con los requisitos legales del país. Para autorizar su uso en estructuras, es necesario contar con evidencia obtenida a través de análisis de laboratorio que demuestre su capacidad para cumplir con las normas sismo-resistentes. En respuesta a esta necesidad, el Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial ha iniciado un proyecto para acompañar al sector productivo en la caracterización de maderas plásticas.

Este artículo incluye la realización de ensayos de laboratorio bajo metodologías específicas para evaluar las propiedades mecánicas y físicas de: tracción, compresión, flexión, dureza, impacto y densidad volumétrica de las maderas plásticas. Estos ensayos proporcionan una visión integral de las capacidades y limitaciones de este material innovador, ofreciendo datos fundamentales para su implementación efectiva en el mercado. Los ensayos de tracción y compresión son esenciales para comprender el comportamiento del material bajo cargas axiales, mientras que los ensayos de flexión e Izod evalúan su resistencia a fuerzas transversales e impactos y la dureza del material se mide para determinar su resistencia al desgaste y a la deformación superficial. Finalmente, la densidad volumétrica se determina para conocer la relación entre la masa y el volumen del material, lo cual es crucial para el diseño y la ingeniería de estructuras.

La investigación y caracterización de las maderas plásticas no solo aporta al conocimiento existente sobre materiales compuestos, sino que también fomenta su viabilidad como una alternativa sostenible y eficiente. Este estudio busca comprender las propiedades intrínsecas de las maderas plásticas y facilitar la comparación con materiales convencionales, identificando sus ventajas y áreas de mejora.

Estos hallazgos servirán como referencia para investigadores, ingenieros y diseñadores interesados en adoptar materiales innovadores que favorezcan un futuro más sostenible.

1.2 Impacto ambiental y normativas de ensayo para la madera plástica en Colombia

La madera plástica es un producto fabricado a partir de residuos plásticos recuperados y reciclados mediante

programas ambientales. Generalmente, la mitad de la materia prima utilizada en su fabricación consiste en polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE) y polipropileno (PP). El HDPE actúa como un agente aglutinante, encapsulando plásticos de alta fusión y los aditivos incorporados. Durante el proceso de extrusión, se añaden otros aditivos a la mezcla para mejorar la apariencia y el rendimiento del producto [3].

La madera plástica tiene muchos usos como alternativa de reemplazo de las maderas convencionales en diferentes aplicaciones. Diseñada para superar la durabilidad de las maderas tradicionales. Investigaciones indican que ofrece buenas propiedades mecánicas [3], lo que contribuye a construcciones con mejores prestaciones, además de ofrecer ventajas ambientales, funcionales, estéticas y de durabilidad.

Entre las ventajas de la madera plástica destacan su alta durabilidad frente a la intemperie, elevada resistencia al impacto, capacidad para soportar trabajos pesados, impermeabilidad, inmunidad a plagas y bajos costos de mantenimiento, todo en comparación con la madera tradicional. Las maderas plásticas se dividen en dos categorías: Plastic Lumber, fabricada al 100% con plástico reciclado, y Wood Plastic Composite (WPC), compuesta por una mezcla de residuos de madera y plástico reciclado. Estos productos tienen una vida útil mayor que las maderas convencionales y mejoran sus propiedades mecánicas y estructurales [3].

La producción de madera plástica es un proceso ecológico y con poco impacto ambiental adverso que se inicia con la recopilación de plásticos reciclados en plantas de reciclaje. En estas instalaciones, los termoplásticos son separados, triturados, mezclados de manera homogénea y fundidos a través de un proceso de extrusión a alta temperatura.

En la actualidad, Colombia carece de una norma específica que verifique al 100% las propiedades mecánicas de la madera plástica, así como sus características físicas, mecánicas, de durabilidad y térmicas [3]. No obstante, algunas normas pueden ser útiles para lograr una caracterización completa, estas son: NTC 6296 – método de ensayo para evaluar las propiedades a la compresión de madera plástica y perfiles, NTC 595 – método de ensayo para determinar las propiedades de tracción en plásticos, NTC 6355 – métodos de ensayo estándar para la determinación de las propiedades de flexión de madera plástica reforzada y no reforzada y productos relacionados, NTC 943 – determinación de la resistencia de los plásticos al impacto del péndulo de IZOD y NTC 467 – Propiedades del caucho. Determinación de dureza con durómetro. Con el uso de estas normas se permite determinar características mecánicas y físicas de la madera plástica como lo son la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión, la resistencia a los impactos, dureza, y resistencia a las condiciones ambientales.

1.3 Objetivos e importancia de la investigación

La investigación tiene como objetivo principal caracterizar las maderas plásticas extruidas, mediante ensayos de tracción, compresión, flexión, dureza, impacto y densidad volumétrica, para determinar sus propiedades mecánicas y físicas.

Además, la investigación pretende obtener evidencia experimental que demuestre la capacidad de las maderas plásticas para cumplir con los requisitos de las normas sismo-

resistentes nacionales, facilitando así su uso en estructuras civiles. Este estudio es crucial para promover la viabilidad de las maderas plásticas como una alternativa sostenible y eficiente en la industria de la construcción, contribuyendo a la reducción de residuos plásticos y a la conservación de recursos naturales.

La importancia de esta investigación radica en la caracterización de la madera plástica, ya que proporcionar información que permita su uso en diversos ámbitos como las construcciones civiles se aborda uno de los principales problemas actuales: la acumulación de residuos plásticos. Al promover el uso de plásticos reciclados en la fabricación de maderas plásticas, se contribuye significativamente a la disminución de estos residuos en el medio ambiente. Las maderas plásticas tienen el potencial de sustituir a los materiales tradicionales en la construcción, ofreciendo propiedades superiores en términos de resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a plagas, lo cual puede llevar a una menor dependencia de recursos no renovables.

Asimismo, la caracterización detallada de las maderas plásticas mediante ensayos mecánicos proporciona datos fundamentales para su implementación, fomentando la innovación y el desarrollo de nuevos materiales de construcción. Al demostrar que las maderas plásticas pueden cumplir con la norma de construcción sismo-resistente NSR-10, se facilita su adopción en aplicaciones estructurales, garantizando la seguridad y la integridad de las construcciones. En la Tabla 1 se presentan las propiedades mecánicas de tracción, compresión y flexión con las que deben cumplir las estructuras de maderas convencionales para su uso en construcciones civiles.

2 Fundamentos y Metodología

2.1 Fundamentos teóricos

En esta sección se describen los fundamentos teóricos para cada tipo de ensayo: tracción, compresión, flexión, dureza, impacto y densidad volumétrica. Estos ensayos permiten evaluar las propiedades esenciales del material, proporcionando datos críticos para determinar su comportamiento bajo diversas condiciones de carga.

2.1.1 Ensayo de tracción

La norma NTC 595 – MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DE TRACCIÓN EN PLÁSTICOS es la encargada de suministrar el procedimiento

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las maderas convencionales.

GRUPO	Esfuerzos admisibles (Mpa)			
	Flexión	Tracción	Compresión vertical	Compresión horizontal
ES1	29,5	21,0	23,0	6,0
ES2	28,5	20,0	22,0	4,3
ES3	23,0	17,0	19,0	3,8
ES4	17,0	12,0	15,0	2,8
ES5	15,0	11,0	13,0	2,0
ES6	12,5	9,0	10,0	1,5

Fuente: NSR-10, 2010.

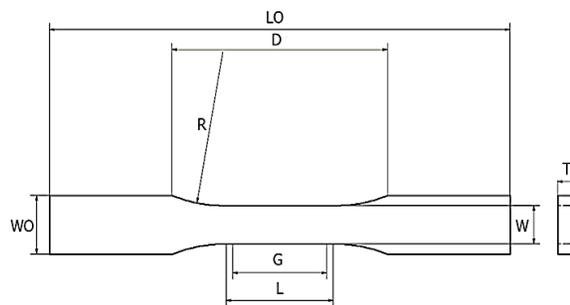


Figure 1. Forma probeta de ensayo de tracción.

Fuente: NTC 595, 2021.

Tabla 2.

Dimensiones establecidas.

Dimensiones Probeta Tracción	
W – ancho de la sección estrecha	19 mm
L – longitud de la sección estrecha	57 mm
WO – ancho total, min	29 mm
LO – longitud total, min	246 mm
G – longitud de referencia	50 mm
D – distancia entre mordazas	115 mm
R – radio del chaflán	76 mm
T – espesor, máx	14 mm

Fuente: NTC 595, 2021.

correspondiente para ejecutar los ensayos de tracción en materiales plásticos reforzados y no reforzados. Dentro de la norma se especifica que el espesor de la probeta no debe superar 14 mm, si los supera este debe ser mecanizado a los 14 mm [4]. Las probetas deben tener las dimensiones establecidas en la Tabla (2), la forma de las probetas se muestra en la Fig. (1).

Además, de acuerdo con las características de la Máquina Universal de Ensayos y cuando la velocidad no se especifica, se utiliza velocidad mínima de la norma de referencia NTC 595:2021 para la geometría de la probeta empleada, la cual produce rotura en un tiempo de ensayo entre 0,5 min y 5 min [4].

Finalmente, el ensayo de tracción en maderas plásticas permite determinar su resistencia a la tracción, que es una medida de la capacidad del material para soportar tensiones sin fracturarse. Esta se calcula dividiendo la carga máxima aplicada durante la prueba por el área de la sección transversal de la muestra. Para el cálculo se utiliza la ecuación (1).

$$\text{Resistencia a la tracción} = \frac{\text{Carga máxima aplicada}}{\text{Área de la sección transversal}} \quad (1)$$

2.1.2 Ensayo de compresión

La norma NTC 6296 – MÉTODO DE ENSAYO PARA EVALUAR LAS PROPIEDADES A LA COMPRESIÓN DE MADERA PLÁSTICA Y PERFILES es la encargada de suministrar el procedimiento correspondiente para ejecutar los ensayos de compresión en materiales plásticos. Dentro de la norma

se especifica que los especímenes de ensayo deben ser cortados del perfil tal como se fabricó la madera plástica, se debe tener precaución en el corte para que las caras expuestas a compresión queden paralelas entre ellas. El único mecanizado

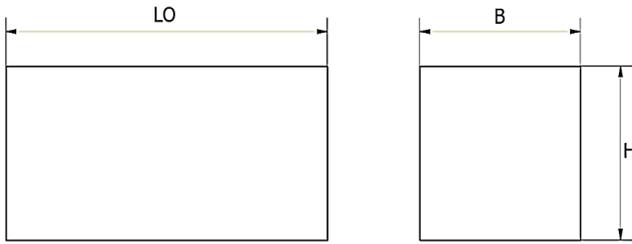


Figure 2. Forma probeta de ensayo de compresión. Fuente: NTC 6296, 2018.

Tabla 3. Dimensiones establecidas.

Dimensiones Probeta Compresión	
B – base	19 mm
H – altura	57 mm
LO – longitud total, min	80 mm

Fuente: NTC 6296, 2018.

permitido es para garantizar las caras paralelas. La altura del espécimen debe ser dos (2) veces el ancho o diámetro del producto [5]. Las probetas deben tener las dimensiones establecidas en la Tabla (3), la forma de las probetas se muestra en la Fig. (2).

Además, de acuerdo con las características de la Máquina Universal de Ensayos la velocidad para el ensayo de compresión en maderas plásticas debe producir una velocidad de deformación unitaria de 15 mm/min, con esto se garantiza que el ensayo se realice en el rango de 1 min a 5 min [5].

Por último, En el ensayo de compresión de maderas plásticas se obtiene la resistencia a la compresión, una medida fundamental de la capacidad del material para soportar fuerzas de aplastamiento o corte sin deformarse o romperse. La resistencia a la compresión se calcula utilizando la ecuación (2).

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{\text{Carga máxima aplicada}}{\text{Área de la sección transversal}} \quad (2)$$

2.1.3 Ensayo de flexión

La norma NTC 6355 – MÉTODOS DE ENSAYO ESTÁNDAR PARA DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE FLEXIÓN DE MADERA PLÁSTICA es la encargada de suministrar el procedimiento correspondiente para ejecutar los ensayos de flexión en materiales plásticos reforzados y no reforzados. Dentro de la norma se especifica que los especímenes de ensayo deben ser tal y como fueron fabricados, cortar a la longitud suficiente que garantice que sobresalga en la distancia entre apoyos [6]. La longitud entre soportes debe ser de 300 mm. De acuerdo con la sección transversal del material que se va a ensayar la longitud total del ítem de ensayo es de 600 mm; en la Fig. (3) se muestra la configuración del ensayo.

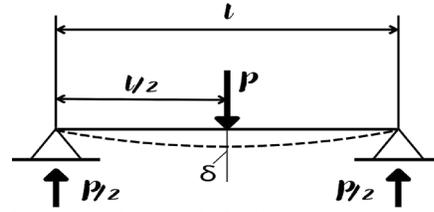


Figure 3. configuración del ensayo de flexión. Fuente: NTC 6355, 2019.

Además, De acuerdo con las características de la Máquina Universal de Ensayos y las exigencias del ensayo, se debe ajustar la velocidad de ensayo $\frac{3 \text{ mm}}{\text{min}}$, con esto se garantiza que el ensayo se realice en el rango de 1 min a 5 min. La velocidad real del cabezal no debe diferir en más de +/- 10% [6].

Finalmente, el ensayo de flexión en maderas plásticas permite determinar el módulo de ruptura, una medida fundamental de la capacidad del material para soportar fuerzas de doblado sin fracturarse. Esta propiedad es esencial para evaluar el rendimiento estructural y la integridad del material en aplicaciones donde se espera que soporten cargas flexoras. El módulo de ruptura se calcula utilizando la ecuación (3).

$$\text{Módulo de ruptura} = \frac{3xP_RxL}{2xbxh^2} \quad (3)$$

Dónde:

P_R : fuerza de ruptura

L : longitud de apoyos

b : base sección transversal

h : altura sección transversal

2.1.4 Ensayo de impacto IZOD

La norma NTC 943 – DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS PLÁSTICOS AL IMPACTO DEL PÉNDULO DEL IZOD es la encargada de suministrar el procedimiento correspondiente para ejecutar los ensayos de impacto en materiales plásticos. Dentro de la norma se especifica que las probetas deben cumplir con la forma que se muestra en la Fig. (4), y las dimensiones de la Tabla (4), [7].

Además, el ensayo de impacto IZOD no requiere una velocidad específica ni el uso de ecuaciones de ensayo debido a que el equipo está diseñado para garantizar condiciones de prueba constantes. Esta configuración permite una medición directa de la energía absorbida por la muestra, lo que simplifica considerablemente el proceso. Esta metodología asegura que los resultados obtenidos sean reproducibles y consistentes, lo cual es fundamental para aplicaciones prácticas y estudios comparativos de materiales.

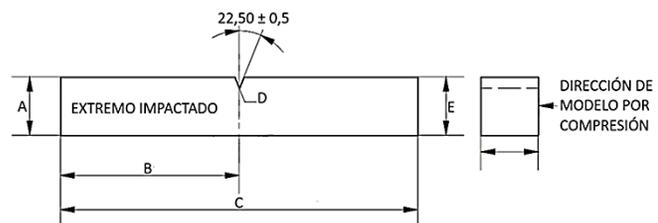


Figure 4. Forma de probeta de ensayo de impacto IZOD. Fuente: NTC 943, 2003.

Tabla 4.
Dimensiones establecidas.

Dimensiones Probeta IZOD		
Lado	mm	in
A	10,16 ± 0,05	0,400 ± 0,002
B	31,8 ± 1,0	1,28 ± 0,04
C	63,50 ± 2,0	2,500 ± 0,08
D	0,25R ± 0,05	0,010R ± 0,002
E	12,70 ± 0,20	0,500 ± 0,008

Fuente: NTC 943, 2003.

2.1.5 Ensayo de dureza

La norma NTC 467 – PROPIEDADES DEL CAUCHO. DETERMINACIÓN DE DUREZA CON DURÓMETRO es la encargada de suministrar el procedimiento correspondiente para ejecutar los ensayos de dureza en cauchos y materiales plásticos. Dentro de la norma se especifica que La muestra de ensayo, debe tener un espesor mínimo de 6,0 mm (0,24 pulgadas), a menos que se demuestre que una probeta más delgada produce resultados equivalentes a los obtenidos con la probeta de 6,0 mm (0,24 pulgadas) [8].

Además, Para realizar un ensayo de dureza Shore D de manera precisa y reproducible, la probeta debe cumplir con condiciones específicas de calidad superficial. La superficie debe ser lisa y plana, libre de rayaduras, surcos, ondulaciones, rebabas y contaminantes como polvo, aceite o grasa. No debe presentar burbujas, grietas, inclusiones ni defectos superficiales que alteren la medición. Los métodos de preparación de la probeta, como corte, lijado o pulido, deben mantener las propiedades superficiales del material.

Por último, en el ensayo de dureza Shore D no se especifica una velocidad particular ni se utilizan ecuaciones de ensayo porque el equipo de medición está diseñado para aplicar la presión de manera uniforme y proporcionar una lectura directa y precisa de la dureza del material, lo que facilita la evaluación de las propiedades del material de manera eficiente y confiable.

2.1.6 Ensayo de densidad volumétrica

Este ensayo se lleva a cabo mediante la medición de la masa de la probeta y sus dimensiones. La masa de la probeta se mide utilizando una balanza analítica con una resolución de 0,01 gr, asegurando que la balanza esté correctamente calibrada para garantizar la exactitud de la medición. La masa se registra en gramos (g). Las dimensiones de la probeta (longitud, ancho y altura) se miden con un pie de rey (calibrador vernier), y es importante que estas mediciones se realicen con cuidado para evitar errores, registrando las dimensiones en milímetros (mm).

Además, la longitud del ítem de ensayo no debe sobrepasar el área efectiva de trabajo de la balanza (200 mm), las caras de la probeta deben ser paralelas planas, para realizar medición en la longitud del ítem de ensayo.

Por último, en el ensayo de densidad volumétrica de

maderas plásticas se obtiene la densidad del material, una medida fundamental de la masa por unidad de volumen del material. La densidad es crucial para determinar la calidad y las propiedades mecánicas de la madera plástica, ya que influye en su resistencia, durabilidad y comportamiento bajo cargas [9]. La densidad volumétrica se calcula utilizando la ecuación (4).

$$\varphi = \frac{m}{v} \quad (4)$$

Dónde:

φ : densidad volumétrica del material

m : masa de la probeta

v : volumen de la probeta

2.2 Diseño del experimento

En el ámbito de la investigación científica y la industria, obtener información confiable y valiosa es esencial para el progreso y la toma de decisiones fundamentadas. Sin embargo, la complejidad de los sistemas y procesos, junto con la variabilidad inherente, presenta desafíos significativos. El diseño de experimentos (DOE) es una metodología poderosa que aborda estos desafíos de manera sistemática. El DOE permite a los investigadores planificar y ejecutar experimentos de forma eficiente, maximizando la información obtenida mientras se minimizan los recursos utilizados. Esto facilita la identificación precisa de factores clave que afectan un proceso o producto, revela interacciones complejas y proporciona una base sólida para decisiones informadas. El DOE optimiza procesos, mejora la calidad, ahorra recursos y avanza en la investigación científica.

En nuestro país, el desarrollo de materiales derivados de plásticos reciclados, como las maderas plásticas, se considera una alternativa ventajosa para aplicaciones sostenibles. Estas maderas plásticas, fabricadas con residuos de plástico, presentan ventajas como resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a plagas, posicionándolas como un excelente sustituto de la madera convencional. Sin embargo, es crucial cumplir con los requisitos legales nacionales, que exigen evidencia de laboratorio sobre sus capacidades mecánicas para su uso en estructuras.

El Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial ha desarrollado un estudio de caracterización de maderas plásticas, incluyendo ensayos de tracción, compresión, flexión, dureza, impacto y densidad volumétrica. Estos ensayos permiten evaluar las propiedades esenciales del material.

La elección de un diseño de experimentos unifactorial se debe a la limitación de disponer de una única condición estándar para la evaluación, minimizando la variabilidad y proporcionando datos precisos. Este enfoque permite establecer una base para entender el comportamiento del material, es eficiente en términos de recursos y proporciona una referencia fundamental para futuros análisis. Los resultados obtenidos pueden generar nuevas preguntas de

investigación, impulsando el avance en la comprensión de las propiedades mecánicas de las maderas plásticas.

2.3 Metodología para caracterización de madera plástica: enfoque unifactorial

Para caracterizar las propiedades mecánicas de la madera plástica bajo una única condición estándar, se sigue una metodología estructurada. Se define inicialmente el factor relevante como la "Condición estándar", asegurando un enfoque claro y consistente en todos los ensayos. Se emplea un diseño unifactorial debido a la limitación de disponer de una sola mezcla de madera plástica, lo que minimiza la variabilidad y facilita la interpretación de los resultados. Cada ensayo se repite al menos tres veces para garantizar la robustez de los datos. Esto resulta en un total de tres ensayos por propiedad mecánica evaluada. Posteriormente, se realiza un análisis estadístico detallado que incluye el cálculo de promedios y desviaciones estándar. La interpretación final busca revelar patrones y tendencias que informen sobre el comportamiento del material bajo la condición estándar.

En el contexto de la ingeniería mecánica, la precisión de las mediciones y la fiabilidad de los datos son cruciales para la toma de decisiones informadas en el diseño y análisis de sistemas y componentes mecánicos. Por esta razón, se ha optado por una muestra de 20 ensayos por propiedad a evaluar, lo que asegura una mayor precisión estadística, reducción de errores aleatorios y una detección más efectiva de patrones significativos en los resultados.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos y físicos realizados sobre las maderas plásticas extruidas estudiadas. Estos ensayos incluyen pruebas de tracción, compresión, flexión, impacto IZOD y densidad volumétrica. Cada una de estas pruebas proporciona información sobre las propiedades mecánicas y físicas del material, permitiendo una evaluación integral de su comportamiento bajo diferentes tipos de cargas y condiciones.

3.1.1 Resultados ensayo de tracción

Los resultados del ensayo de tracción, realizados conforme a la norma NTC 595, indican que las maderas plásticas extruidas presentan una resistencia a la tracción promedio de 11,5 MPa, con una desviación estándar de 1,08 MPa. La consistencia de los resultados, reflejada en la baja desviación estándar, sugiere una uniformidad en la calidad del material producido. Los resultados se presentan en la Tabla (5).

Tabla 5.
Resultados del ensayo.

Ensayo de Tracción		
Ítem	Resistencia a la tracción (MPa)	Ue*
CDITICL-IE061-2024-LEM	11,98	0,14
CDITICL-IE062-2024-LEM	12,79	0,15
CDITICL-IE063-2024-LEM	12,71	0,64
CDITICL-IE064-2024-LEM	11,31	0,13
CDITICL-IE065-2024-LEM	11,07	0,13
CDITICL-IE066-2024-LEM	12,35	0,15
CDITICL-IE067-2024-LEM	12,35	0,15
CDITICL-IE068-2024-LEM	12,53	0,15
CDITICL-IE069-2024-LEM	12,32	0,15
CDITICL-IE070-2024-LEM	12,85	0,15
CDITICL-IE071-2024-LEM	11,56	0,14
CDITICL-IE072-2024-LEM	11,24	0,13
CDITICL-IE073-2024-LEM	11,09	0,13
CDITICL-IE074-2024-LEM	10,79	0,13
CDITICL-IE075-2024-LEM	9,94	0,12
CDITICL-IE076-2024-LEM	9,91	0,12
CDITICL-IE077-2024-LEM	9,21	0,11
CDITICL-IE078-2024-LEM	12,29	0,15
CDITICL-IE079-2024-LEM	10,23	0,12
CDITICL-IE080-2024-LEM	12,25	0,15
Promedio	11,5	
Desviación estándar	1,08	

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Resultados ensayo de compresión

En la Tabla (6), se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de compresión vertical realizados.

Tabla 6.
Resultados del ensayo.

Ensayo de Compresión Vertical		
Ítem	Resistencia a la compresión (MPa)	Ue*
CDITICL-IE001-2024-LEM	18,1	0,21
CDITICL-IE002-2024-LEM	21,7	0,25
CDITICL-IE003-2024-LEM	21,7	0,25
CDITICL-IE004-2024-LEM	20,3	0,24
CDITICL-IE005-2024-LEM	20,5	0,24
CDITICL-IE006-2024-LEM	15,3	0,18
CDITICL-IE007-2024-LEM	20	0,23
CDITICL-IE008-2024-LEM	18,1	0,21
CDITICL-IE009-2024-LEM	13,4	0,16
CDITICL-IE010-2024-LEM	19,3	0,22
CDITICL-IE011-2024-LEM	15,1	0,18
CDITICL-IE012-2024-LEM	16,7	0,19
CDITICL-IE013-2024-LEM	21,1	0,24
CDITICL-IE014-2024-LEM	24,8	0,29
CDITICL-IE015-2024-LEM	25,4	0,30
CDITICL-IE016-2024-LEM	19,8	0,23
CDITICL-IE017-2024-LEM	21,7	0,25
CDITICL-IE018-2024-LEM	19,9	0,23
CDITICL-IE019-2024-LEM	16,1	0,19
CDITICL-IE020-2024-LEM	22,9	0,27
Promedio	19,6	
Desviación estándar	3,17	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7.
Resultados del ensayo.

Ensayo de Compresión Horizontal		
Ítem	Resistencia a la compresión (MPa)	Ue*
CDITICL-IE021-2024-LEM	8	0,09
CDITICL-IE022-2024-LEM	12,8	0,15
CDITICL-IE023-2024-LEM	10,3	0,12
CDITICL-IE024-2024-LEM	11,7	0,14
CDITICL-IE025-2024-LEM	11,1	0,13
CDITICL-IE026-2024-LEM	7,2	0,08
CDITICL-IE027-2024-LEM	12,8	0,15
CDITICL-IE028-2024-LEM	11,7	0,14
CDITICL-IE029-2024-LEM	6,5	0,08
CDITICL-IE030-2024-LEM	13,2	0,15
CDITICL-IE031-2024-LEM	11	0,13
CDITICL-IE032-2024-LEM	8,5	0,10
CDITICL-IE033-2024-LEM	9,7	0,11
CDITICL-IE034-2024-LEM	15	0,17
CDITICL-IE035-2024-LEM	7,5	0,09
CDITICL-IE036-2024-LEM	15,7	0,18
CDITICL-IE037-2024-LEM	9,9	0,12
CDITICL-IE038-2024-LEM	10	0,12
CDITICL-IE039-2024-LEM	25	0,29
CDITICL-IE040-2024-LEM	17,2	0,20
Promedio	11,7	
Desviación estándar	4,23	

Fuente: Elaboración propia.

En el ensayo de compresión vertical, siguiendo la norma NTC 6296, las maderas plásticas extruidas mostraron una resistencia a la compresión promedio de 19,6 MPa, con una desviación estándar de 3,17 MPa. Este resultado destaca la capacidad del material para resistir fuerzas de aplastamiento aplicadas perpendicularmente a las fibras o capas del material, lo cual es fundamental para su uso en aplicaciones estructurales donde las cargas verticales son predominantes.

En la Tabla (7), se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de compresión horizontal realizados.

En el ensayo de compresión horizontal, las maderas plásticas extruidas presentaron una resistencia a la compresión promedio de 11,7 MPa, con una desviación estándar de 4,23 MPa. Este ensayo mide la capacidad del material para resistir fuerzas aplicadas paralelamente a las fibras o capas del material. La resistencia a la compresión horizontal es crucial para aplicaciones donde el material debe soportar cargas distribuidas lateralmente, como en el caso de muros y tabiques.

3.1.3 Resultados Ensayo de flexion

En la Tabla (8), se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de flexión realizados.

De acuerdo con la norma NTC 6355, los ensayos de flexión revelaron que las maderas plásticas extruidas poseen una resistencia a la flexión promedio de 20,1 MPa, con una desviación estándar de 1,09 MPa. La alta resistencia a la flexión es un indicador clave de que el material puede soportar cargas transversales significativas sin fracturarse, lo cual es esencial para su uso en componentes que requieren rigidez y estabilidad

Tabla 8.
Resultados del ensayo.

Ensayo de Flexión		
Ítem	Resistencia a la flexión (MPa)	Ue*
CDITICL-IE041-2024-LEM	19,67	0,24
CDITICL-IE042-2024-LEM	19,67	0,24
CDITICL-IE043-2024-LEM	20,39	0,24
CDITICL-IE044-2024-LEM	18,6	0,22
CDITICL-IE045-2024-LEM	18,4	0,22
CDITICL-IE046-2024-LEM	18,86	0,23
CDITICL-IE047-2024-LEM	18,84	0,23
CDITICL-IE048-2024-LEM	20,69	0,25
CDITICL-IE049-2024-LEM	20,83	0,25
CDITICL-IE050-2024-LEM	20,77	0,25
CDITICL-IE051-2024-LEM	20,22	0,24
CDITICL-IE052-2024-LEM	21,14	0,25
CDITICL-IE053-2024-LEM	20,21	0,24
CDITICL-IE054-2024-LEM	20,36	0,24
CDITICL-IE055-2024-LEM	20,0	0,24
CDITICL-IE056-2024-LEM	18,91	0,23
CDITICL-IE057-2024-LEM	18,84	0,23
CDITICL-IE058-2024-LEM	20,47	0,24
CDITICL-IE059-2024-LEM	21,68	0,26
CDITICL-IE060-2024-LEM	22,5	0,27
Promedio	20,1	
Desviación estándar	1,09	

Fuente: Elaboración propia.

estructural. La rigidez proporcionada por esta resistencia asegura que los elementos de construcción hechos de maderas plásticas mantendrán su integridad bajo esfuerzos de flexión.

Además, la resistencia a la flexión es crítica para evaluar el comportamiento del material bajo condiciones de carga reales, donde las fuerzas de flexión pueden variar en magnitud y dirección. La baja desviación estándar en los resultados sugiere una alta consistencia en el comportamiento del material, lo cual es vital para aplicaciones estructurales donde la uniformidad en el desempeño puede significar la diferencia entre una estructura segura y una comprometida. Esto implica que las maderas plásticas no solo son robustas sino también fiables, garantizando seguridad y durabilidad en sus aplicaciones.

3.1.4 Resultados Ensayo de impacto IZOD

En la Tabla (9), se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de impacto realizados.

Tabla 9.
Resultados del ensayo

Ensayo de Impacto IZOD	
Ítem	Energía absorbida $\frac{kJ}{m^2}$
CDITICL-IE063-2024-LMI	2,409
CDITICL-IE064-2024-LMI	2,412
CDITICL-IE065-2024-LMI	2,398
CDITICL-IE066-2024-LMI	2,403
CDITICL-IE067-2024-LMI	2,410
CDITICL-IE068-2024-LMI	2,404
CDITICL-IE069-2024-LMI	2,399
CDITICL-IE070-2024-LMI	2,395
CDITICL-IE071-2024-LMI	2,408
CDITICL-IE072-2024-LMI	2,408
CDITICL-IE073-2024-LMI	2,399
CDITICL-IE074-2024-LMI	2,411
CDITICL-IE075-2024-LMI	2,397

CDITICL-IE076-2024-LMI	2,402
CDITICL-IE077-2024-LMI	2,409
CDITICL-IE078-2024-LMI	2,394
CDITICL-IE079-2024-LMI	2,395
CDITICL-IE080-2024-LMI	2,398
CDITICL-IE081-2024-LMI	2,414
CDITICL-IE082-2024-LMI	2,421
Promedio	2,404
Desviación estándar	0,01

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del ensayo de impacto IZOD, conforme a la norma NTC 943, mostraron una energía absorbida promedio de 2,404 J, con una desviación estándar de 0,01 J. Este ensayo mide la capacidad del material para resistir impactos repentinos, lo que demuestra que las maderas plásticas tienen una buena resistencia al impacto. Esto es especialmente relevante en aplicaciones donde los componentes pueden estar sujetos a golpes o impactos súbitos.

3.1.5 Resultados ensayo de dureza

En la Tabla (10), se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de dureza shore D realizados.

El ensayo de dureza, realizado según la norma NTC 467, arrojó un promedio de dureza Shore D de 58,6, con una desviación estándar de 2,46. La dureza es un indicador de la resistencia del material al desgaste y a la deformación superficial. Los resultados sugieren que las maderas plásticas tienen una dureza adecuada para soportar el uso y la exposición en diversas condiciones. Esta propiedad es crucial para aplicaciones en las que el material estará en contacto continuo con otros objetos.

Tabla 10.
Resultados del ensayo.

Ensayo de Dureza		
Ítem	Shore D	Ue*
CDITICL-IE001-2024-LMI	60,4	4,8
CDITICL-IE002-2024-LMI	57	0,9
CDITICL-IE003-2024-LMI	57,9	4,0
CDITICL-IE004-2024-LMI	64,7	4,9
CDITICL-IE005-2024-LMI	59,3	0,6
CDITICL-IE006-2024-LMI	56,2	5,9
CDITICL-IE007-2024-LMI	55,8	4,2
CDITICL-IE008-2024-LMI	56,5	3,2
CDITICL-IE009-2024-LMI	57,4	9,1
CDITICL-IE010-2024-LMI	56,9	3,3
CDITICL-IE011-2024-LMI	53,5	1,1
CDITICL-IE012-2024-LMI	60,7	2,9
CDITICL-IE013-2024-LMI	59,8	0,8
CDITICL-IE014-2024-LMI	58,7	0,5
CDITICL-IE015-2024-LMI	59,4	0,5
CDITICL-IE016-2024-LMI	56,8	1,0
CDITICL-IE017-2024-LMI	61,7	1,2
CDITICL-IE018-2024-LMI	60,3	0,6
CDITICL-IE019-2024-LMI	58,9	0,4
CDITICL-IE020-2024-LMI	59,3	0,6
Promedio	58,6	
Desviación estándar	2,46	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11.
Resultados del ensayo.

Ensayo de Dureza		
Ítem	Densidad $\frac{Kg}{m^3}$	Ue*
CDITICL-IE084-2024-LMI	176,6	0,000010
CDITICL-IE085-2024-LMI	216,4	0,000011
CDITICL-IE086-2024-LMI	212,1	0,000011
CDITICL-IE087-2024-LMI	181,1	0,000011
CDITICL-IE088-2024-LMI	179,2	0,000011
CDITICL-IE089-2024-LMI	213,3	0,000011
CDITICL-IE090-2024-LMI	231,0	0,000011
CDITICL-IE091-2024-LMI	222,9	0,000011
CDITICL-IE092-2024-LMI	176,7	0,000018
CDITICL-IE093-2024-LMI	235,8	0,000011
CDITICL-IE094-2024-LMI	178,0	0,000013
CDITICL-IE095-2024-LMI	180,6	0,000012
CDITICL-IE096-2024-LMI	183,6	0,000012
CDITICL-IE097-2024-LMI	178,0	0,000012
CDITICL-IE098-2024-LMI	176,0	0,000012
CDITICL-IE099-2024-LMI	182,0	0,000011
CDITICL-IE100-2024-LMI	189,6	0,000011
CDITICL-IE101-2024-LMI	226,0	0,000011
CDITICL-IE102-2024-LMI	175,5	0,000011
CDITICL-IE103-2024-LMI	177,6	0,000011
Promedio	194,7	
Desviación estándar	21,79	

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6 Resultados de ensayo de densidad volumétrica

En la Tabla (11), se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de densidad volumétrica realizados.

La densidad volumétrica de las maderas plásticas extruidas, medida según las especificaciones detalladas, mostró un valor promedio de 194,7 kg/m³, con una desviación estándar de 21,79 kg/m³. La densidad volumétrica es crucial para entender la relación masa-volumen del material y su implicación en el diseño y la ingeniería de estructuras. Un material con una densidad adecuada garantiza que las estructuras no solo sean robustas sino también manejables en términos de peso. La densidad comparable a la de algunas maderas convencionales sugiere que las maderas plásticas pueden ofrecer un equilibrio entre ligereza y resistencia, favoreciendo su uso en una amplia gama de aplicaciones constructivas.

3.2 Consolidado de resultados

A continuación, en la Tabla (12) se presenta un consolidado de los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos y físicos realizados sobre las maderas plásticas extruidas estudiadas.

Tabla 12.
Resultados de los ensayos.

Consolidado de Resultados			
Propiedad	Unidad	Promedio	Ue*
Tracción	MPa	11,5	1,08
Dureza (Shore D)	Shore D	58,6	2,46
Compresión Vertical	MPa	19,6	3,17
Compresión Horizontal	MPa	11,7	4,23
Densidad Volumétrica	$\frac{Kg}{m^3}$	194,9	21,79
Flexión	MPa	20,1	1,08
Impacto	$\frac{KJ}{m^2}$	2,4	0,01

Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

El estudio detallado de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas plásticas extruidas revela un material versátil y prometedor para aplicaciones en la industria de la construcción. Con una resistencia a la tracción promedio de 11,5 MPa, estas maderas plásticas demuestran una capacidad considerable para soportar cargas tensiles, fundamentales para estructuras que requieren robustez y fiabilidad estructural.

Los ensayos de compresión vertical y horizontal indican que estas maderas plásticas pueden resistir compresiones de hasta 19,6 MPa y 11,7 MPa respectivamente, lo cual las posiciona como una opción viable para aplicaciones donde la capacidad de soportar cargas concentradas y distribuidas es crucial.

La resistencia a la flexión promedio de 20,1 MPa subraya su capacidad para resistir deformaciones bajo cargas transversales, siendo adecuadas para vigas y otros componentes estructurales. Además, la alta absorción de energía en el ensayo de impacto IZOD (2,404 J) indica una buena capacidad para resistir impactos repentinos, lo cual es esencial en entornos donde se requiere protección contra daños mecánicos.

Con una dureza Shore D promedio de 58,6, estas maderas plásticas ofrecen una superficie resistente al desgaste y duradera, ideal para aplicaciones donde la integridad estructural a largo plazo es crítica. La densidad volumétrica promedio de 194,7 kg/m³ equilibra eficazmente la resistencia con la ligereza, facilitando su manipulación y transporte en proyectos constructivos.

La utilización de plásticos reciclados en la producción de estas maderas plásticas no solo reduce el impacto ambiental al disminuir la dependencia de recursos naturales no renovables, sino que también promueve prácticas sostenibles dentro de la industria de la construcción. Este enfoque innovador no solo cumple con los estándares técnicos exigentes, sino que también responde a la creciente demanda por materiales de construcción que sean económica y ambientalmente responsables.

Con base en el objetivo de la investigación, que es caracterizar las maderas plásticas extruidas mediante ensayos de tracción, compresión, flexión, dureza, impacto y densidad volumétrica para determinar sus propiedades mecánicas y físicas, al comparar las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos realizados con las de las maderas convencionales consignadas en la Tabla (1) y con referencia en la norma NSR-10, se puede concluir que las maderas plásticas se clasifican dentro del grupo de maderas ES5, debido a que su resistencia a la tracción es la que presenta menor capacidad. Esta clasificación, sin embargo, no desmerece las ventajas significativas que ofrecen las maderas plásticas extruidas. Las propiedades mecánicas y físicas evaluadas demuestran que son adecuadas para diversas aplicaciones en la industria de la construcción, proporcionando no solo rendimiento y durabilidad, sino también contribuyendo de manera significativa a la sostenibilidad global y al manejo

responsable de los recursos naturales.

Referencias

- [1] Rincón-Garzón, L., Rodríguez-Carmona, E., y Espitia-Cubillos, A., Madera plástica. Un producto amigo del planeta., *Semilleros*, 3(5), pp. 41-48, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.27.6616>
- [2] Organización de las Naciones Unidas., Informe de la ONU sobre contaminación por plásticos advierte sobre falsas soluciones y confirma la necesidad de una acción mundial urgente, UNEP, [en línea]. 2021. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/informe-de-la-onu-sobre-contaminacion-por-plasticos#:~:text=El%20informe%20destaca%20que%20el,y%2037%20millon es%20de%20toneladas.>
- [3] Ospina, C.A., Evaluación de las propiedades mecánicas de los perfiles extruidos a partir de mezclas de polímeros reciclados para la fabricación de estibas de maderas plásticas en Maderpol S.A.S., Universidad Eafit, [en línea]. 2014. Disponible en: <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/8299>
- [4] ICONTEC., NTC 595: 2024. Método de ensayo para determinar las propiedades de tracción en plásticos., ICONTEC, [en línea]. 2024. Disponible en: <https://tienda.icontec.org>
- [5] ICONTEC., NTC 6296: 2018. Método de ensayo para evaluar las propiedades a la compresión de madera plástica y perfiles., ICONTEC, [en línea]. 2018. Disponible en: <https://tienda.icontec.org>
- [6] ICONTEC., NTC 6355: 2019. Métodos de ensayo estándar para determinación de las propiedades de flexión de madera plástica reforzada y no reforzada y productos relacionados., [en línea]. ICONTEC, 2019. Disponible en: <https://tienda.icontec.org>
- [7] ICONTEC., NTC 943: 2003. Determinación de la resistencia de los plásticos al impacto del péndulo del IZOD., ICONTEC, [en línea]. 2003. Disponible en: <https://tienda.icontec.org>
- [8] ICONTEC., NTC 467: 2006. Propiedades del caucho. Determinación de dureza con durómetro., ICONTEC, [en línea]. 2006. Disponible en: <https://tienda.icontec.org>
- [9] López, D.F., y Rojas A.F., Factores que influyen las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos maderos plásticos., *Entre Ciencia E Ingeniería*, 12(23), pp. 93-102. 2018. DOI: <https://doi.org/10.31908/19098367.3708>
- [10] AIS., NSR-10: reglamento colombiano de construcción sismo resistente., Asociación colombiana de ingeniería sísmica, [en línea]. 2022. Disponible en: <https://asosismica.org.co/producto/reglamento-colombiano-de-construccion-sismo-resistente-nsr-10-incluye-4-tomos/>

J.D. López-Chica, es Esp. en Gestión de Proyectos de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD, Colombia. Ing. mecánico de la Universidad Tecnológica de Pereira – UTP, Colombia. Responsable de laboratorios de ensayos mecánicos y mediciones industriales con código de acreditación 19-LAB-020 del Centro de Diseño e innovación Tecnológico Industrial SENA Regional Risaralda, Colombia. Docente catedrático del programa de ingeniería mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.
ORCID: 0000-0001-8174-7787

D.A. Ramírez-Cardona, es MSc. en Ingeniería Mecánica. Ing. en Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Docente catedrático de los programas de ingeniería mecánica e ingeniería de manufactura de la Universidad Tecnológica de Pereira.
ORCID: 0009-0007-0944-4475

L.B. Acosta-Agudelo, es MSc. en Administración Económica y Financiera. Ing. Física de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Investigadora SENNOVA del Centro de Diseño e innovación Tecnológico Industrial SENA Regional Risaralda, Colombia.
ORCID: 0000-0002-5827-7905

Y.M. Rivera-Gómez, es Lic. en Pedagogía Infantil de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Investigadora SENNOVA del Centro de Diseño e innovación Tecnológico Industrial SENA Regional Risaralda, Colombia.
ORCID: 0009-0009-9652-9884