UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Aplicabilidad de prefabricados de madera plástica en la construcción, como sistema sostenible y eficiente en Bogotá sustituyendo los sistemas normalizados

Arq. Luisa Fernanda Sierra Franco

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia
2024

Aplicabilidad de prefabricados de madera plástica en la construcción, como sistema sostenible y eficiente en Bogotá sustituyendo los sistemas normalizados

Arq. Luisa Fernanda Sierra Franco

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Construcción

Director:
PhD (c) Ing MSc. Arq. Andrés Felipe Pérez Marín

Línea de Investigación:
Investigación de prefabricados en la construcción

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción
Bogotá, Colombia
2024

A Dios, que sin él no hubiera podido culminar este nuevo logro, siempre guiándome por el mejor camino.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

_____

Luisa Fernanda Sierra Franco

Fecha 22/01/2024

Agradecimientos

A mi hermano mayor,

Dedico este trabajo a Daniel Fernando Sierra Polanco, quien me ayudó y apoyó a iniciar esta maestría, sin él no hubiera podido realizar este sueño que el día de hoy estoy culminando.

A mi padre,

Luis Fernando Sierra Arbeláez, Padre mío, que siempre me ha apoyado en cada momento de mi vida, llevándome de la mano a ser cada vez mejor, Todo se lo debo a él.

A mi madre y hermanas,

Gracias a las mujeres de mi vida, que le han dado brillo y amor a cada decisión que he tomado, las que me han consentido toda mi vida. Madre, Martha Lucia Franco, y hermanas Isabel Sierra y Katherine Sierra.

A mi Hermano Luis,

Que a pesar de la distancia siempre en mis pensamientos y mi corazón.

A mi director Andrés Felipe Pérez Marín,

Infinitas gracias por su orientación, apoyo y dedicación en este proceso. Su compromiso, experiencia y paciencia me han permitido culminar con esta maravillosa etapa que abrirá nuevas sendas en mi vida.

Resumen

Este proyecto tiene como finalidad abordar dos desafíos ambientales significativos que afectan tanto el planeta en general como a Colombia en particular, el primero se refiere a la contaminación derivada de la fabricación de ladrillos a base de arcilla mientras que el segundo está relacionado con la acumulación de residuos plásticos provenientes del posconsumo de la población que permanece en el medio ambiente durante largos períodos de tiempo, debido a su lenta degradación.

Con el propósito de enfrentar este desafío, esta investigación propone mejorar y optimizar de forma teórica la estructura del panel prefabricado que ha sido desarrollado por la empresa EcoCocon ubicada en Bratislava, Slovakia, implementando elementos innovadores y ecológicos como es la madera plástica que incorpora materiales compuestos de polietileno de alta densidad como matriz y fibras de madera y vidrio como refuerzo, en reemplazo de la madera natural con que están elaborados los paneles, ofreciendo una alternativa sostenible y eficiente.

El estudio se llevó a cabo mediante una metodología cuantitativa, realizando un revisión de la literatura sobre las propiedades mecánicas y físicas del polietileno de alta densidad y las fibras de madera y vidrio, con estos datos obtenidos se elaboró una regla de mezclas para determinar el volumen de la matriz y las fibras para la estructura del panel propuesto, con el fin de encontrar las mejores características del compuesto, por último se realizó una comparación entre las propiedades mecánicas alcanzadas en este estudio y las planteadas por la empresa mencionada.

Palabras clave: *Construcción Sostenible, Prefabricados, Medio Ambiente, Contaminación, Madera plástica, Paja.*

Abstract

Applicability of prefabricated plastic wood in construction, as a sustainable and efficient system in Bogotá, replacing standardized systems

This project aims to address two significant environmental challenges that affect both the planet in general and Colombia in particular, the first refers to the pollution derived from the manufacture of clay-based bricks while the second is related to the accumulation of plastic waste from post-consumption of the population that remains in the environment for long periods of time, due to its slow degradation.

With the purpose of facing this challenge, this research proposes to theoretically improve and optimize the structure of the prefabricated panel that has been developed by the company EcoCocon located in Bratislava, Slovakia, implementing innovative and ecological elements such as plastic wood that incorporates composite materials. high-density polyethylene as a matrix and wood and glass fibers as reinforcement, replacing the natural wood with which the panels are made, offering a sustainable and efficient alternative.

The study was carried out using a quantitative methodology, carrying out a review of the literature on the mechanical and physical properties of high-density polyethylene and wood and glass fibers. With these data obtained, a mixture rule was developed to determine the volume of the matrix and fibers for the structure of the proposed panel, in order to find the best characteristics of the compound, finally a comparison was made between the mechanical properties achieved in this study and those proposed by the aforementioned company.

Keywords: Sustainable Construction, Prefabricated, Environment, Pollution, Wood-Plastic, Straw.

Contenido

Resumen **6**

Abstract **7**

Lista de Ilustraciones **10**

Lista de tablas **11**

Lista de Símbolos y abreviaturas **12**

Introducción **14**

1. Planteamiento del problema **16**
1.1 Justificación 19
1.1.1 Preguntas de investigación 21
1.2 Objetivos 21
1.2.1 Objetivo general 21
1.2.2 Objetivos específicos 22

2. Marco teórico **23**
2.1 Generalidades y normativa de la construcción en Colombia 25
2.1.1 Construcciones normalizadas en Colombia (muros en mampostería de ladrillo en arcilla) 25
2.1.2 Fabricación de ladrillo para la construcción de muros en mampostería 27
2.1.3 Desarrollo sostenible en Colombia 28
2.1.4 Economía Circular 29
2.1.5 Política y normativa ambiental en Colombia 30
2.2 Generalidades del nuevo sistema a emplearse 32
2.2.1 Materiales Compuestos 33
2.2.2 Material compuesto de matriz orgánica polimérica termoplástica. 36
2.2.3 Normativa de la madera plástica (WPC) 37
2.3 Materiales (Análisis del material compuesto a emplearse) 37
2.3.1 Polietileno de alta densidad (HDPE) 37
2.3.2 Fibra de Pino Romerón (Retrophyllum rospigliosii) 40
2.3.3 Fibra de vidrio como refuerzo 43
2.3.4 Paja como material de relleno del muro prefabricado 44
2.3.5 Madera plástica (WPC): matriz de Polietileno de alta densidad (HDPE) + Fibras de madera de pino romerón 46
2.4 Panel prefabricado de madera natural con relleno de paja elaborado por la empresa EcoCocon 53

3. Metodología 57
3.1 Descripción de las etapas del estudio: 59
3.1.1 Etapa 1: Métodos 59
3.1.1.1 Diseño de mezclas 59
3.1.1.2 Análisis comparativo y búsqueda de variables entre la empresa EcoCocon y la propuesta en esta investigación 63
3.1.2 Etapa 2: Resultados 64
3.1.3 Etapa 3: Conclusiones y recomendaciones 64

4. Discusión de resultados 65
4.1 Métodos 66
Diseño de la estructura del panel propuesto 66
4.1.1 Diseño de mezclas 67
4.2.2.1 Cuadro comparativo entre el marco existente y el panel propuesto en esta investigación 75
4.2 Resultados y discusión 76
4.2.1 Resultados del análisis del material compuesto 76
4.2.2 Resultado del diseño de mezclas 76
4.2.3 Resultados del cuadro comparativo 78

5. Conclusiones y recomendaciones 79
5.1 Conclusiones 80
5.2 Recomendaciones. 81

A. Anexo: Diseño de mezclas (Software Microsoft Excel) ..... ¡Error! Marcador no definido.

B. Anexo: Brochure *EcoCocon sample structural calculation* 82

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Árbol de problemas sobre la contaminación del medio ambiente generada por los residuos plásticos y la producción masiva de ladrillos en las industrias de arcilla. 18
Ilustración 2. Detalles Estructurales de Mampostería Reforzada 26
Ilustración 3. imagen ilustrativa mampostería confinada 26
Ilustración 4. objetivos de desarrollo sostenible. 29
Ilustración 5. Línea de tiempo de la normativa ambiental en Colombia. 32
Ilustración 6. Esquema de un polímero reforzado con fibras 34
Ilustración 7.Esquema de materiales compuestos 35
Ilustración 8. Glasgow Science Tower 36
Ilustración 9. Árbol de Retrophyllum rospigliosii 41
Ilustración 10. Estructura del panel madera natural 55
Ilustración 11. Estructura madera natural con relleno de paja 55
Ilustración 12. Refuerzos horizontales contra pandeo 56
Ilustración 13. Método de conexión con tornillos para unir dos paneles 56
Ilustración 14. Proceso Cualitativo 58
Ilustración 15. Etapas de la metodología de la investigación 59
Ilustración 16. Formato y desarrollo regla de mezclas en Microsoft Excel. 61
Ilustración 17. Propiedades y volumen de los materiales a utilizar. 62
Ilustración 18. propiedades mecánicas del material compuesto. 62
Ilustración 19. cálculos propiedades mecánicas del panel propuesto. 63
Ilustración 20. Medidas del panel propuesto 66

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades mecánicas del HDPE 39
Tabla 2. Propiedades de los polímeros más comunes 39
Tabla 3. Características del Pino Romerón 40
Tabla 4. Propiedades Físicas Pino Romerón 41
Tabla 5. Propiedades Mecánicas Pino Romerón 42
Tabla 6. Propiedades Mecánicas Fibra de Vidrio Tipo E 44
Tabla 7. Cantidad en kg de contaminantes emitidos en la quema por hectárea. 45
Tabla 8. Propiedades Mecánicas del HDPE 46
Tabla 9. Propiedades Mecánicas Pino romerón 47
Tabla 10. Resistencia a esfuerzos de la madera natural vs madera plástica 48
Tabla 11. Resistencia a la tensión y flexión de los compuestos de madera plástica en HDPE sin modificación en la matriz o madera. 49
Tabla 12. Resistencia a la tensión y flexión de los compuestos de madera plástica en HDPE empleando agentes de Acople 49
Tabla 13. Módulos a tensión y flexión de los compuestos de madera plástica en HDPE empleando agentes de acople. 50
Tabla 14. Resistencia y módulo de flexión de compuestos de madera plástica en HDPE/PEAD comparando diferentes tipos de madera a un 40% de contenido. 51
Tabla 15. Formulaciones de compuestos de madera y plástico 51
Tabla 16. Absorción de agua e hinchamiento del espesor de compuestos de HDPE y harina de madera. 52
Tabla 17. Propiedades mecánicas de HDPE y harina de madera. 52
Tabla 18. Módulo de tracción de madera plástica de HDPE reforzado con fibra de vidrio y/o fibra de madera 53
Tabla 19. Características del panel 40m 54
Tabla 20. Comparación de medidas del panel de la empresa EcoCocon y del panel propuesto 67
Tabla 21. Volumen del material compuesto. 68
Tabla 22. Propiedades de la matriz. 68
Tabla 23. Propiedades de la fibra 1. 68
Tabla 24. Propiedades de la fibra 2. 69
Tabla 25. Cuadro comparativo entre el panel EcoCocon y el panel propuesto. 75
Tabla 26. Propiedades mecánicas del panel en madera plástica. 77
Tabla 27. Resultados del estudio 78

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos

Símbolo	Término
A	Área
ρ	Densidad
V	Volumen
E	Módulo de elasticidad
ɣ	Coeficiente de poisson
G	Módulo de corte
λ	Esbeltez
Lk	Longitud de pandeo
β	Beta
σ	Esfuerzo
Mb	Momento longitudinal
Δ	Desplazamiento
g0	Aceleración de la gravedad
acq	Aceleración vertical
er	Centro de gravedad
Ew-Z	Altura efectiva
v	Velocidad de servicio
fq	Factor de aceleración
Ls	Longitud base del elemento
W - Bs -Ls	Espesor del elemento
S	Módulo de la sección
I	Inercia
i	Radio de giro
R	Brazo palanca
P	Carga
d	Diámetro de la fibra
M0	Momento centro
L	Longitud del elemento
B	Base del elemento
TC	Torción
δ	Deformación

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ACV	Análisis del ciclo de vida
ASTM	American society for testing and materials
BC	Black carbon
CO	Monóxido de carbono
CAEM	Corporación Ambiental Empresarial
CONPES	Consejo Nacional de Políticas Económicas y Sociales
CH_4	Emisiones de Metano
DNP	Departamento Nacional de Planeación
FV	Fibra de vidrio
HDPE/PEAD	High Density Polyethylene/Polietileno de alta densidad
HF	Fluoruro de hidrógeno
MASP	Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública
MOE	Módulo de Young
NO_2	Dióxido de nitrógeno
NTC	Norma Técnica Colombiana
PM	Material particulado
PP	Polipropileno
PE	Polietileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloruro de vinilo
PIB	Producto Interno Bruto
PND	Plan Nacional de Desarrollo
PM10	Partículas menores a 10 micras
RAE	Real academia española
RCD	Residuos de construcción y demolición
rHDPE	Polietileno de alta densidad reciclado
vHDPE	Polietileno de alta densidad virgen
SO_2	Dióxido de azufre
WPC	Wood plastic composite
MSNM	Metros sobre el nivel del mar

Introducción

La contaminación atmosférica es definida como la presencia de sustancias en el aire en cantidades que pueden ser perjudiciales para la vida humana, además de afectar las condiciones meteorológicas y climáticas del planeta. Un contaminante atmosférico es aquel que al mezclarse con el aire puede modificar su composición natural como humo, gases, bacterias, desperdicios y residuos. (IDEAM - Instituto de Hidrología, n.d.)

En Colombia, el sector de la construcción es una de las muchas industrias generadoras de residuos y contaminación atmosférica, ocasionando un elevado gasto energético para el planeta. La implementación de sistemas constructivos tradicionales como los muros en mampostería en bloques de arcilla agota gran cantidad de recursos no renovables del planeta como los minerales y combustibles fósiles, debido a la necesidad de recolección extensiva de materia prima además del alto gasto energético por la utilización de hornos ladrilleros para su producción, los cuales emiten diferentes tipos de sustancias como el material particulado (PM), el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), metales y el black carbon (BC), provenientes de la combustión incompleta. El material particulado es considerado como uno de los seis contaminantes con mayor número de investigaciones en temas de calidad del aire, salud y bienestar para la población (Aguilera Pizano et al., 2021), lo que conlleva a una gran problemática ambiental.

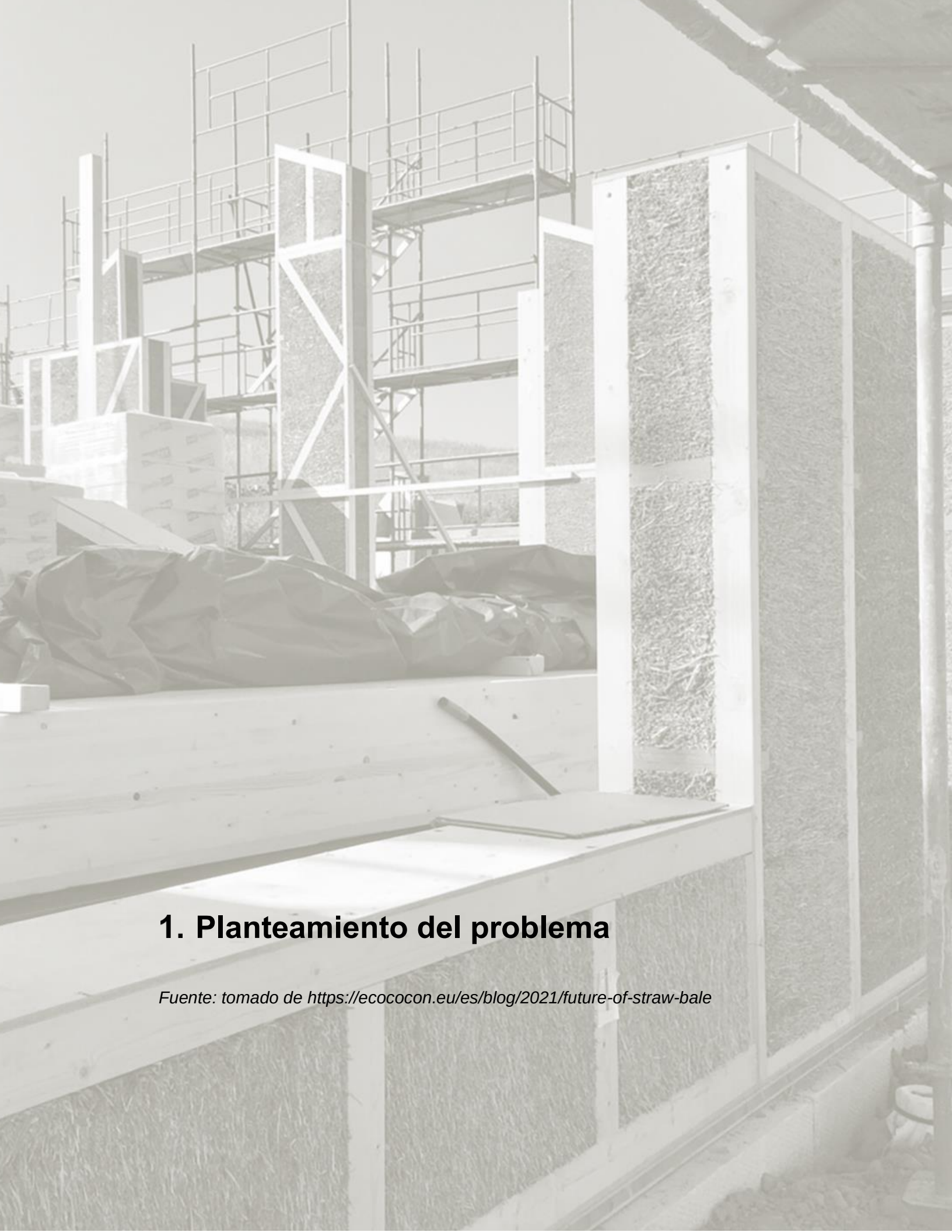
Otra problemática ambiental a gran escala es la producción de plástico. En Colombia se producen alrededor de 1.4 millones de toneladas de materiales plásticos por año, incluyendo polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), polietileno (PE), entre otros.(Rodríguez T, 2022)**,** según la rueda de prensa en la Universidad de los Andes por la Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública (MASP) y Greenpeace Colombia, cada hogar colombiano genera 4.5 kilos de basura al día, cada 24 horas, solo en Bogotá se eliminan casi 6.300 toneladas de residuos, el 56% corresponde a plásticos de distinto tipo. Es decir, casi el 60% de la basura diaria de Bogotá es desecho plástico.

Las ventas de plásticos en Colombia tuvieron en el 2018 un incremento de un 2.5 %, con producciones anuales de 60.000 toneladas de bolsas plásticas, 2.000 toneladas de pitillos y 23.000 toneladas de tapas plásticas."(Quintero Giraldo, 2019)**,** Esta problemática ambiental se hace evidente por la considerable cantidad de toneladas de plástico generadas en Colombia. Una de las estrategias propuestas en esta investigación para abordar esta problemática es extender la vida útil del material mediante su reciclaje y su posterior reutilización en proyectos de construcción, lo que ayudará a mitigar la contaminación ambiental de nuestro país con la implementación de un novedoso sistema prefabricado aplicable en el sector de la construcción.

En la exploración y búsqueda de un sistema efectivo y eficiente, se encontró la empresa EcoCocon. Esta compañía ha desarrollado un panel prefabricado con una estructura de madera natural y relleno de paja, el cual genera cero residuos, no requiere consumo de agua, utiliza una cantidad mínima de energía primaria produciéndose de manera responsable. Sin embargo, se identificó una desventaja: la utilización de madera natural en la estructura del panel. Por lo tanto, este estudio propone la optimización y mejora adicional de este panel mediante la incorporación de materiales compuestos reciclados en su estructura.

Los materiales compuestos ofrecen una combinación única de baja densidad y altas prestaciones mecánicas en comparación con los materiales convencionales. Por ende, este diseño teórico, ha integrado polietileno de alta densidad (HDPE) como matriz, junto con fibras de madera y vidrio como refuerzo. Asimismo, se llevó a cabo un cálculo de proporción para determinar el volumen de la matriz y las fibras mediante la regla de mezclas. Por último, se desarrollaron y analizaron las fórmulas que determinan las propiedades mecánicas del material compuesto.

Estos datos permitieron una comparación directa entre las propiedades mecánicas obtenidas en este estudio y las planteadas por la empresa EcoCocon. Donde se concluye que este nuevo diseño expone mejoras significativas en sus prestaciones mecánicas. Además de su contribución al medio ambiente posicionándolo como una opción factible y prometedora para su utilización en proyectos de construcción.



1. Planteamiento del problema

Fuente: tomado de https://ecococon.eu/es/blog/2021/future-of-straw-bale

El planteamiento del problema surge a partir de evidenciar la alta contaminación medioambiental de nuestro país, por ende, esta investigación aborda la problemática de la contaminación producida por residuos plásticos y por la fabricación de ladrillos a base de arcilla, teniendo en cuenta que para que se logre su disminución se requiere una acción puntual que mejore el equilibrio ambiental y la sostenibilidad en el país.

Colombia ha sido reconocida por tener diversidad de animales y plantas con un registro de por lo menos 58.312 especies en su ecosistema (García Pérez, 2021), que lastimosamente se están viendo afectados por la incrementada producción de plástico proveniente de aproximadamente 3.600 industrias, además, de la inapropiada disposición final de estos residuos, causando que el medio ambiente en este país considerado verde se vea afectado año tras año. En el año 2020 el congreso de la República de Colombia aprobó la ley 274 que tiene por objetivo prohibir en el territorio nacional la fabricación, importación, exportación, comercialización y distribución de plásticos de un solo uso (Grupo de Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2021) lo que generó una buena medida para combatir la crisis climática que se está presentando, con un enfoque integral y gestión sostenible, el congreso busca promover la economía circular, alargando el ciclo de vida de los materiales, y así, mitigar la contaminación que genera la disposición final de los plásticos de un solo uso. Adicionalmente el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible emitió el plan nacional para la Gestión Sostenible de plásticos de un solo uso en el cual especifica que durante el 2022-2023 las empresas encargadas del uso, distribución y comercialización de los productos plásticos de un solo uso deberán proceder a sustituirlos por productos reutilizables o en su defecto, por productos de materiales compostables u otras alternativas técnica y ambientalmente demostradas. (Grupo de Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible et al., 2021)

Por otro lado, se encuentra la industria de producción de arcilla y ladrillos el cual tiene un vínculo directo con la industria de la construcción que es el consumidor principal. De acuerdo con el Inventario del sector ladrillero elaborado por la Corporación Ambiental Empresarial (CAEM), con el apoyo de la Coalición del Clima y Aire Limpio, en Colombia se han podido caracterizar 1.508 industrias ladrilleras considerando 15 departamentos con una producción anual estimada en cerca de 13 millones de toneladas de materiales cerámicos al año. Estos productos de arcilla abastecen el mercado nacional e internacional

en países como Estados Unidos, República Dominicana y Panamá (González Herrera et al., 2021), Este sector ladrillero genera gasto energético de gran magnitud en sus procesos de secado y de cocción dejando como resultado alta emisión de material particulado, emisiones gaseosas como óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, monóxido de carbono, dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, metales pesados, cloruro de hidrógeno (HCL), y fluoruro de hidrógeno (HF), impactando negativamente la calidad el aire**.** (González Herrera et al., 2021)

La solución a la problemática planteada se ha abordado mediante la consideración de los siguientes elementos definidos: justificación, objetivos de investigación y la pregunta de investigación. Cada uno de estos aspectos ha seguido un proceso inductivo, interpretativo, iterativo y recurrente

Ilustración 1. Árbol de problemas sobre la contaminación del medio ambiente generada por los residuos plásticos y la producción masiva de ladrillos en las industrias de arcilla.

Fuente: Elaboración propia

1.1 Justificación

La contaminación atmosférica (calidad del aire) y la contaminación por plástico son problemáticas ambientales de gran impacto en Colombia. Es imperativo que las entidades gubernamentales, la sociedad civil, las industrias y cualquier otra entidad en el país emprendan acciones para abordar el cambio climático que se está experimentando. Esto implica la implementación de sistemas sostenibles y eficientes que reduzcan la contaminación ambiental.

Según un estudio realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) en 2015, la mala calidad del aire provocó alrededor de 8.052 muertes en Colombia, con costos asociados de aproximadamente 12,2 billones de pesos colombianos, lo que equivale al 1,5% del PIB de ese año (Ministerio de Ambiente de Colombia, n.d.)**.**

Las edificaciones que utilizan muros de mampostería, así como los desechos plásticos, generan un gran impacto en diversas fuentes naturales debido a la extracción de materias primas, el proceso de fabricación y la subsiguiente degradación. La persistencia de estos elementos en el entorno dificulta su eliminación, presentando así un desafío a nivel global. Estas preocupaciones medioambientales pueden clasificarse en tres categorías principales: suelo, aire y agua.

Problemáticas ambientales causadas por muros en mampostería

Suelo: en la fabricación de ladrillos de arcilla se produce afectación y modificación morfológica del suelo debido a la extracción de materias como la arcilla, causando procesos de erosión temprana y pérdida en la capa vegetal, asimismo, durante el proceso de construcción de cualquier edificación se generar diferentes tipos de residuos ya sean escombros, sobrantes de material o productos líquidos que son llevados y vertidos en diferentes suelos causando alta contaminación ambiental.

Aire: la alteración en la calidad de aire se produce por consecuencia del uso de combustibles fósiles debido a la extracción de materia prima ocasionando partículas suspendidas totales que, a largo plazo, provocan contaminación ambiental y múltiples enfermedades respiratorias a la población.

Agua: la explotación minera que se realiza para la extracción de arcilla en muchas ocasiones origina vertimientos de partículas insolubles a los cuerpos hídricos cercanos alterando la calidad del agua, afectando la naturaleza y por consiguiente la vida humana.

Problemáticas ambientales causadas por residuos plásticos

Suelo: Los plásticos se están acumulando en gran medida en la tierra debido a su uso desenfrenado de las industrias, se estima que 80% de los micro plásticos presentes en los océanos son originarios de los ecosistemas terrestres provenientes de suelos agrícolas, actividades industriales, construcción, transporte y vertederos (Rodríguez Seijo, 2022). El uso indiscriminado del plástico en suelos agrícolas como la utilización de fertilizantes con cubierta de plástico, las envolturas que cubren los invernaderos, los tubos de riego y demás productos, son elementos que con el tiempo se van degradando y se filtran a la tierra ocasionando que pasen a la cadena alimentaria, siendo perjudicial para el suelo y la salud de la población**.**

Aire: El plástico es uno de los materiales que más se ha acumulado en nuestro planeta, estando presente en todos los ecosistemas, su uso inapropiado y mala disposición ha causado que la contaminación terrestre, el océano y su fauna marina se vean afectados. En el artículo publicado “Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas” se expone que los micro-plásticos que son pequeñas partículas con diámetros de 0.001 a 5mm provenientes del plástico, se han encontrado en regiones remotas polares y en partes muy profundas del océano, llegando a la conclusión de que mediante el transporte atmosférico han podido viajar de una ciudad a un área alejada del planeta. (Zhang et al., 2019), lo anteriormente descrito es evidencia del alcance que puede tener la contaminación por plásticos provocando una problemática ambiental global cada vez mayor.

Agua: como ya se ha mencionado durante el desarrollo de este documento, el plástico es uno de los grandes contaminantes que está abatiendo al planeta. Desde el momento que inicia su degradación liberar toxinas que son altamente contaminantes para el suelo y el agua, además de ser perjudicial para la fauna y flora. Los océanos producen el 50% del oxígeno del planeta y son esenciales para la preservación y sostenimiento de todas las especies vegetales y animales. Anualmente, 11 millones de toneladas de residuos.

plásticos entran a los océanos, esto equivale a arrojar un camión lleno de plástico por minuto al mar (WWF, 2022).

Considerando los impactos ambientales previamente mencionados causados por las construcciones tradicionales (muros de mampostería) y el uso inadecuado del plástico, surge la necesidad de implementar un sistema prefabricado sostenible que pueda reciclar el plástico desechado. Asimismo, se busca encontrar un nuevo material que pueda sustituir al ladrillo de arcilla, promoviendo un nuevo modelo de construcción sustentable y sostenible que contribuya a la mitigación del cambio climático al reducir la huella de carbono asociada a la industria de la construcción, con beneficios técnicos, económicos y ambientales significativos.

1.1.1 Preguntas de investigación

De acuerdo con Hernández, para definir los objetivos es necesario plantear mediante preguntas, el problema que se estudiará (Hernández, 2014). Acudiendo a lo anterior, para esta investigación se formuló la siguiente pregunta:

- ¿Los sistemas prefabricados que emplean materiales compuestos a partir de madera plástica pueden reducir los impactos ambientales que están generando actualmente los desechos plásticos y las construcciones normalizadas en mampostería en ladrillo de arcilla?

1.2 Objetivos

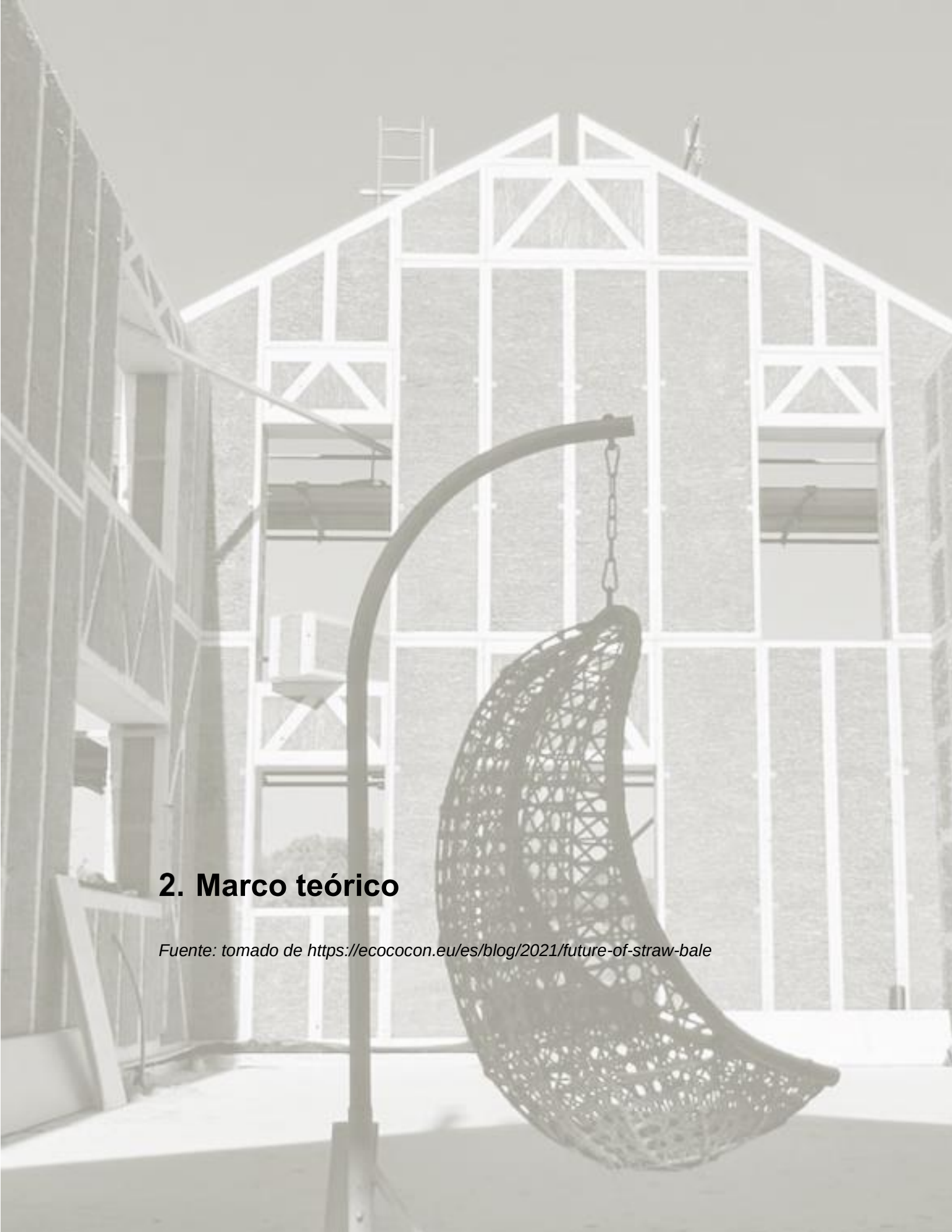
Para este trabajo se ha propuesto un objetivo general y tres objetivos específicos, los cuales están descritos a continuación.

1.2.1 Objetivo general

Introducir un sistema pionero de paneles ecológicos prefabricados que integra materiales compuestos de madera plástica.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar el material compuesto a partir de la regla de mezclas.
2. Desarrollar las fórmulas y cálculos que determinan las propiedades físico-mecánicas del material compuesto.
3. Realizar un Análisis Comparativo entre las propiedades mecánicas del material compuesto de esta investigación con las propiedades mecánicas del panel prefabricado con estructura de madera natural y relleno de paja



2. Marco teórico

Fuente: tomado de https://ecococon.eu/es/blog/2021/future-of-straw-bale

En el presente capitulo se describirán conceptos básicos de la construcción en Colombia con el fin de brindar una mejor comprensión del objetivo principal de este documento, además, de conocer lo que se está implementando actualmente en Colombia en temas de medio ambiente e incursión de nuevos materiales. Este trabajo fue realizado bajo la investigación de fuentes bibliográficas nacionales e internacionales que respaldan la información descrita con la finalidad de proporcionar información válida y confiable.

La construcción en nuestro país de acuerdo con el Conpes 3919, es uno de los pilares fundamentales en el crecimiento de la economía en Colombia. “Para el año 2017, el sector alcanzó una participación del 4,9 % dentro del Producto Interno Bruto (PIB), cifra que representa un aumento considerable frente a su aporte en 2001, cuando dicha participación no supera el 1,8 % del PIB (Conpes 3919, 2018), por este crecimiento exponencial y por ser uno de los sectores que más impacta el entorno, representando un alto consumo de materiales renovables y emisiones de gases de efecto invernadero.

Colombia es un país que invierte muy poco en política e inversión del Estado en ciencia, tecnología e innovación (CTeI) para mejorar o innovar en materiales o sistemas constructivos (Delgado Murcia, 2023), utilizando los mismos conocimientos por décadas, sin renovación o avance alguno.

Dicho lo anterior, es necesario desarrollar nuevos sistemas constructivos sostenibles y eficientes, que puedan ayudar a reducir el cambio climático desde la industria de la construcción, además de brindar alternativas que puedan mejorar tiempos de ejecución, costos y riesgos laborales en el proyecto, con el fin de aumentar el desarrollo del país. A continuación, se amplían algunos de los conceptos a tener en cuenta para una mejor comprensión de este documento.

2.1 Generalidades y normativa de la construcción en Colombia

2.1.1 Construcciones normalizadas en Colombia (muros en mampostería de ladrillo en arcilla)

Algunas de las principales actividades de la “construcción normalizada” en Colombia son el uso de las estructuras en concreto y obras en mampostería, cabe resaltar que este tipo de construcciones deben ser ejecutadas por personas calificadas que conocieron y aprendieron de estas actividades a través del legado de sus predecesores, siendo un ejercicio tradicional que se caracteriza por su naturalidad y espontaneidad, teniendo en cuenta su tendencia generacional. Los materiales utilizados son prácticamente los mismos que se han utilizado por décadas. (Soto Ardila, 2022)

Para llevar a cabo dichas construcciones se conocen tres aspectos principales: materiales, mano de obra, equipos o maquinarias. La mano de obra se entiende como el factor principal en pro del rendimiento para aligerar o finiquitar los trabajos de la construcción respecto a los materiales, es necesario tener en cuenta la disposición para adquirirlos, las características de la zona en que se va a construir, el factor financiero, entre otros. (Arellano & Mejía, 2014). Esta investigación tomará como referencia las construcciones normalizadas de muros en mampostería (ladrillos de arcilla).

El término mampostería, según la Real academia española (RAE), es la obra que se realiza con mampuestos colocados y ajustados unos con otros en determinado orden e hiladas. Estos mampuestos pueden ser ladrillos, piedras o bloques de cemento prefabricados que pueden ser unidos con mortero. (Real Academia Española (RAE) & Asociación de academias de la lengua española, 2022). El mortero es un compuesto que contiene aglomerantes, agregados finos y agua como una solución eficaz que ha sido empleada a lo largo de la historia.

Para la construcción en mampostería se pueden implementar diferentes sistemas constructivos. a continuación, se describirán los más utilizados:

Sistema constructivo mampostería reforzada: este sistema está compuesto por elementos pétreos que pueden ser mampuestos en concreto o arcilla unidos entre sí por

mortero, adicionalmente se refuerzan las dovelas del bloque con acero y grouting (mortero de relleno). El grouting es una mezcla de cemento, agregados y agua. Este sistema es característico por funcionar como una sola pieza.

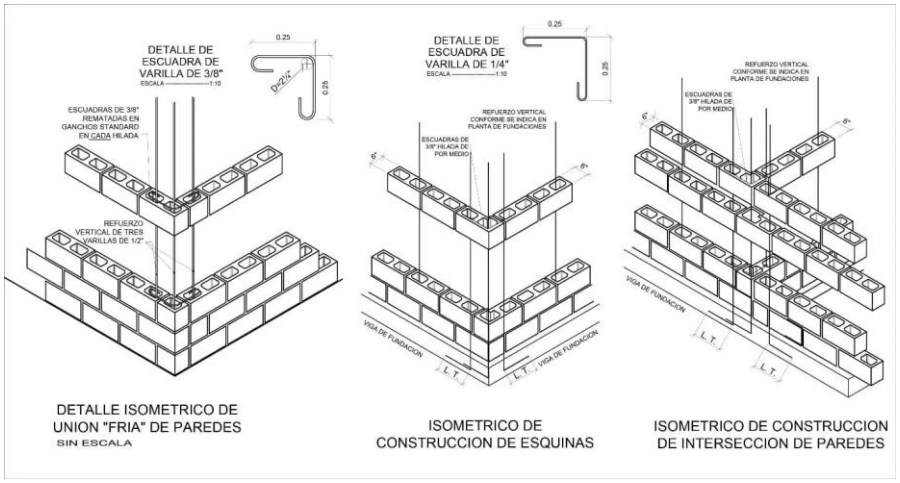


Ilustración 2. Detalles Estructurales de Mampostería Reforzada

Fuente: tomado de https://gc-construcciones.net/lo-necesitas-saber-mamposteria-reforzada/

Sistema constructivo mampostería confinada: la mampostería confinada es un sistema que consiste en la construcción de un muro portante con bloques de ladrillo posteriormente reforzado con elementos de concreto como columnas y vigas vaciadas en sitio, en este sistema los ladrillos soportan las cargas en dirección vertical y horizontal. (Carlevaro et al., 2017)

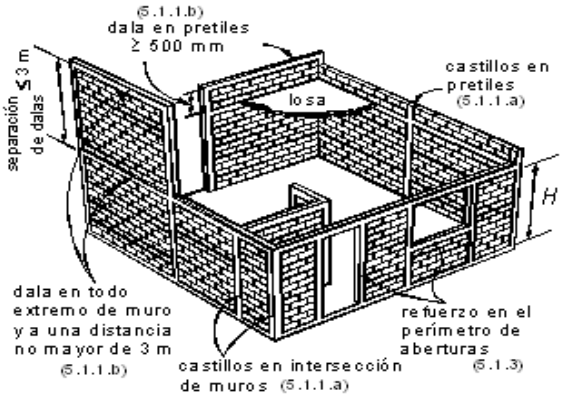


Ilustración 3. imagen ilustrativa mampostería confinada

Fuente: tomado de http://www.contraloriadf.gob.mx/prontuario/vigente/745.htm

2.1.2 Fabricación de ladrillo para la construcción de muros en mampostería

En la fabricación y producción de ladrillos se deben tener en cuenta una serie de componentes para obtener una buena calidad del material, los suelos deben ser arcillo-arenosos con un contenido de arena con respecto al material arcilloso del 25 – 30% (Betancourt et al., 2013). Para el proceso de fabricación de los ladrillos en arcilla, es necesario pasar por las siguientes etapas:

1. Preparación y descapote del terreno
2. Extracción de la arcilla
3. Almacenamiento de la arcilla
4. Molienda y tamizado: reducir y homogeneizar el tamaño de las partículas
5. Mezcla: preparación la mezcla con la plasticidad necesaria
6. Moldeado: prensado o extrusión
7. Secado
8. Cocción

Los ladrillos en arcilla son fabricados en un proceso de cocción a altas temperaturas en hornos a temperaturas aproximadas de 800°C, produciendo una gran huella de carbono además de altos niveles de energía gris (Labaied et al., 2022). La energía gris es un término que se utiliza para describir la cantidad de energía no renovable y recursos naturales que se consumen durante el ciclo de vida completo de un producto, desde su fabricación hasta su uso y disposición. La relevancia en la fabricación de productos de arcilla y ladrillos en la industria nacional se debe a su importante conexión con el sector de la construcción por ser su principal consumidor. En el año 2015, Colombia se caracterizó por tener 1.508 industrias ladrilleras en 15 departamentos diferentes, con una producción anual estimada cerca de 13 millones de toneladas de materiales cerámicos al año.(González Herrera et al., 2021), causando grandes impactos ambientales provenientes de su proceso de explotación y producción como la contaminación atmosférica (emisión de humo, partículas y gases,) además de la disposición de residuos que contaminan el suelo y del agua

2.1.3 Desarrollo sostenible en Colombia

En 1983, la Asamblea General de las Naciones Unidas estableció el concepto de Desarrollo Sostenible a través de la Comisión Brundtland. En 1987, esta comisión publicó el informe titulado "Nuestro Futuro Común", que marcó un hito histórico al introducir por primera vez el término "desarrollo sostenible". Este concepto se refiere a un tipo de desarrollo que busca satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las oportunidades de las generaciones futuras (CEPAL, n.d.)

Años más tarde, en la Conferencia de las Naciones Unidas, realizada en Río de Janeiro en junio de 1992, sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, se empieza a implementar el concepto de desarrollo sostenible con el objetivo de establecer una alianza mundial en la cual se proteja el sistema ambiental y el desarrollo mundial sin perder los intereses de todos.

Considerando lo mencionado previamente, en la actualidad en el ámbito mundial, se busca restaurar y preservar el equilibrio entre el entorno natural y el entorno construido mediante la adopción de nuevas técnicas y prácticas en la construcción. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.). explorando nuevas alternativas de recursos y procesos constructivos que ayuden a disminuir el gasto energético ocasionado por la industria.

Por otro lado, y cambiando de un ámbito global a uno en particular, Colombia se puede percibir como un país que aún tiene muchas falencias en investigación e implementación de sostenibilidad en la construcción, no obstante, se han llevado a cabo algunos avances en temas normativos que, aunque su aplicación no es obligatoria, colaboran a la regulación de los procesos constructivos actuales. Algunas de las normas vigentes son: el documento de Política Nacional de Edificaciones Sostenibles (Conpes 3919) con la resolución 0549 de 2015, dicta una guía para el ahorro de la energía y el agua emitido por el Consejo Nacional de Política Económica y Social. asimismo, se evidencia la Norma Técnica Colombiana (NTC 6112 de 2016, Sello Ambiental Colombiano) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, estableciendo criterios ambientales para el diseño y construcción de edificaciones con uso diferente a vivienda (Conpes 3919, 2018). Esta política se alinea con los compromisos establecidos en la agenda internacional de desarrollo sostenible con un enfoque especial en los objetivos de desarrollo sostenible destacándose en el objetivo

11, que se centra en la promoción de ciudades y comunidades sostenibles, así como en el objetivo 12, que se enfoca en establecer prácticas de consumo y producción sostenibles.

El termino desarrollo sostenible según el Conpes 3919, es aquella edificación que utiliza eficientemente de los recursos como la energía, el agua y los materiales, adaptándose de manera armoniosa al entorno, al tiempo que garantiza comodidad y bienestar a las personas, basándose en 3 pilares fundamentales: sostenibilidad económica, sostenibilidad ambiental y sostenibilidad social. (Conpes 3919, 2018).

Ilustración 4. objetivos de desarrollo sostenible.

Fuente: tomado de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/

2.1.4 Economía Circular

El concepto de ciclo de vida de los materiales se refiere al conjunto de etapas que abarcan desde la concepción, diseño, construcción, uso, mantenimiento, renovación y finalmente la disposición o demolición de una construcción, La relación entre el ciclo de vida y las construcciones es crucial en términos de sostenibilidad y eficiencia dado que se consideran temas de elección de material buscando que sean duraderos y sostenibles además de obtener mejoras energéticas con nuevas tecnologías, centrándose en minimizar el impacto ambiental. De acuerdo con los conceptos anteriores se emplea una herramienta llamada

Análisis del Ciclo de Vida (ACV) que permite ecuánimemente valorar y calcular los impactos que una edificación pueda causar al medio ambiente durante el transcurso de su vida útil. El fundamento esencial de la herramienta implica reconocer y detallar cada una de las fases del proceso de vida de los productos, desde la obtención de las materias primas, la fabricación, la distribución y el uso del producto terminado, hasta su potencial para ser reutilizado, reciclado o eliminado. Actualmente se rige bajo dos normativas principales la **NTC-ISO 14040:** gestión Ambiental, análisis de ciclo de vida, principios y marco de referencia y la **NTC-ISO 14044:** gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, requisitos y directrices. (Metropol, n.d.)

Teniendo en cuenta lo anterior, este documento presenta el desarrollo de un sistema constructivo sustentable, implementando la madera plástica como material que involucra plástico reciclado de polietileno de alta densidad (HDPE), brindando una serie de beneficios como ahorro energético, alargamiento del ciclo de vida de los materiales y reducción de contaminación ambiental. Además de la utilización de materiales dentro del sistema como la paja, incorporándola como material de relleno ofreciendo a su vez insonorización al sistema, con múltiples de beneficios en su fabricación pues no necesita de grandes maquinarias, combustibles o insumos.

2.1.5 Política y normativa ambiental en Colombia

La normativa y política ambiental en Colombia es extensa y se compone de una serie de leyes, decretos, resoluciones y políticas gubernamentales diseñadas para promover la protección del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales en el país. A continuación, se nombrarán las más representativas:

Desde el año 1988 se evidencia que Colombia ha acogido políticas internacionales para la reducción de contaminación y protección del medio ambiente, adoptando el protocolo de Montreal de 1987 con el objetivo de la reducción de sustancias agotadoras de la capa de ozono.

En 1993, a partir de la ley 99 se crea El Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial con el cual se estableció el marco general de política ambiental colombiana. Sentando las primeras bases para la gestión ambiental en el país, empezando

a ejercer políticas para la prevención y control de la contaminación atmosférica y la calidad del aire.

Posteriormente en el año 2002, el Ministerio de Ambiente convocó en un Aula Abierta representantes de diferentes entidades del Estado, Unidades Ambientales, Institutos de investigación, Constructores, y demás actores, para generar un espacio de reflexión sobre las experiencias que se han tenido en temas de medio ambiente y sostenibilidad. como resultado recogieron un documento con las memorias del evento con el fin de seguir adelante en la formulación de políticas urbanas y ambientales del país. (Ministerio de Medio Ambiente, 2002)

En el año 2008, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo adopta la política de Gestión Ambiental Urbana, cuyo objetivo es fomentar directrices y criterios para el manejo sostenible de las áreas urbanas con el fin de consolidar ciudades más compactas, equitativas y sostenibles. (Política Gestión Ambiental Urbana, 2008)

Posteriormente, en el año 2010 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo adoptó la Política Nacional del Recurso Hídrico con el fin de determinar reglas unificadas para el manejo de los recursos hídricos en el país, garantizando la protección, sostenibilidad y conservación del agua. (Política Nacional Para La Gestión Integral Del Recuso Hídrico, 2010)

En el año 2015 se crea el decreto 1076, denominado decreto único del sector Ambiental y Desarrollo Sostenible, el cual reglamenta la mayoría de la normativa ambiental en Colombia, como la biodiversidad, agua, aire y desarrollo sostenible, años más tarde se adopta la resolución 472 del 2017 la cual reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD). (González Herrera et al., 2021)

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2018-2022 “Pacto por Colombia, Pacto por la equidad, busca alcanzar una economía más productiva y equitativa, construyendo un nuevo país más sostenible y amigable con el medio ambiente basándose en un esquema de economía circular, con el reciclaje y alargamiento del ciclo de vida de los materiales.

Por otra parte, el Consejo Nacional de Políticas Económicas y Sociales (CONPES) adoptó el documento CONPES 3943 de 2018, para el mejoramiento de la calidad del aire reduciendo la contaminación que afecta la salud y el medio ambiente, implementando

nuevas técnicas innovadoras para la industria de la construcción. Adicionalmente en el año 2019 se implementó la Estrategia Nacional de Economía Circular, que busca la reducción en el gasto de los recursos naturales además de ciclos de vida más largos en materiales, agua y energía. (González Herrera et al., 2021)

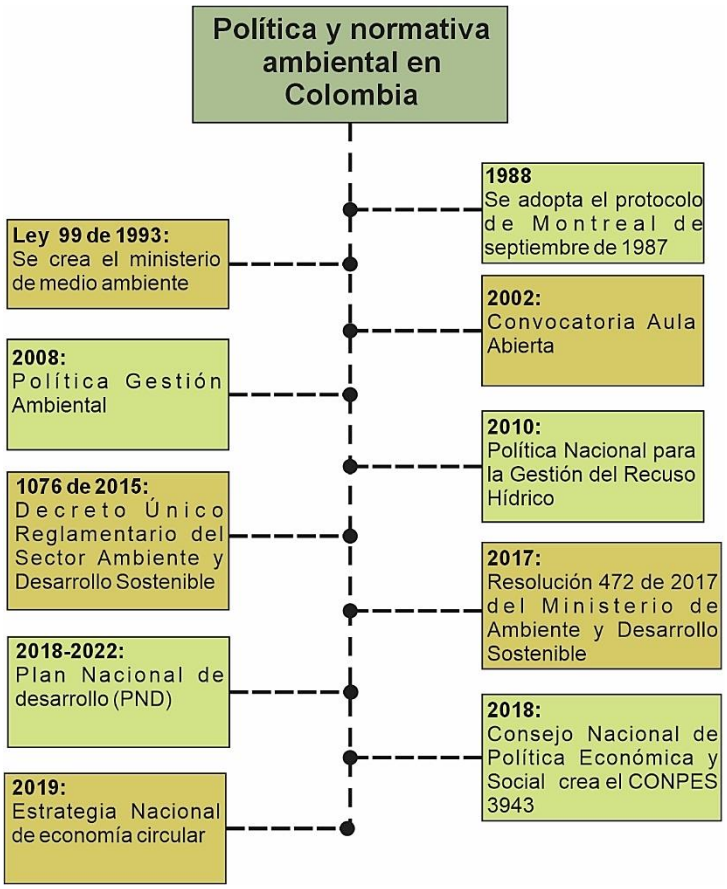


Ilustración 5. Línea de tiempo de la normativa ambiental en Colombia.

Fuente: Elaboración propia con referencia de (González Herrera et al., 2021).

2.2 Generalidades del nuevo sistema a emplearse

Para esta investigación se propone un nuevo sistema constructivo prefabricado que pueda ayudar a reducir la contaminación ambiental además de que sea eficiente y eficaz en su implementación. Este sistema utilizará tecnología de materiales compuestos brindando más resistencia, durabilidad y menor impacto al medio ambiente. Este material compuesto se adquiere del reciclaje de materiales como el plástico y que, con la mezcla de un segundo

o tercer material agregado se puede mejorar significativamente sus propiedades mecánicas. (Contreras Pérez et al., 2020)

2.2.1 Materiales Compuestos

Los materiales compuestos o *composites* por su traducción en inglés, son combinaciones de dos o más elementos microscópicos o macroscópicos que varían en su forma y composición química, y no pueden mezclarse entre sí. Una particularidad de estos materiales es que cada uno de ellos consta de dos elementos distintos: uno es el componente de refuerzo o también llamado Fase, que puede ser una fibra o partícula, y el otro es la matriz siendo el aglutinante y protector que mantiene unidos los componentes. (Ramos-Tino, 2010), estos compuestos se han empleado con la finalidad de mejorar las características de los materiales, proporcionándoles ventajas que son raramente halladas en cerámicos, plásticos o metales.

Simplificando lo anterior, se puede ver este tipo de compuestos en la naturaleza como en la madera, que se compone de fibras de celulosa (Refuerzo) en un aglutinante de lignina (Matriz). También se pueden realizar compuestos sintéticos, utilizando matrices de metal, cerámica o polímeros reforzados con diversidad en fibras y partículas. Las fibras son las más utilizadas dado que las partículas no brindan las mismas propiedades en resistencia (Ramos-Tino, 2010).

En la actualidad, el material compuesto sintético más utilizado es el de matriz polimérica (Aglutinante) en el que se le introducen fibras de material cerámico como la fibra de vidrio (Refuerzo), casi siempre, las fibras ocupan el 60% del volumen en estos compuestos. La matriz siendo el aglutinante del componente, une cada una de las fibras encargándose de transmitir las cargas al refuerzo (Ramos-Tino, 2010). Estudios demuestran que el refuerzo se utiliza y se incorpora a la matriz para aumentar las propiedades de resistencia y rigidez del polímero. (García-Velázquez, Amado-Moreno, Campbell, et al., 2013), pero se debe tener en cuenta que las fibras de refuerzo no pueden soportar todas las cargas, siendo débiles a los esfuerzos de tipo transversal y de compresión, por tanto, la estructura de la matriz que es el aglutinante recibe estas cargas.

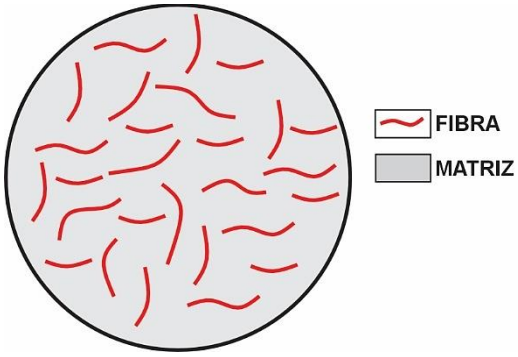


Ilustración 6. Esquema de un polímero reforzado con fibras

Fuente: Elaboración propia con Referencia de (Ramos-Tino, 2010)

Ahora bien, los compuestos reforzados con partículas poseen características isotrópicas por ende sus propiedades mecánicas son las mismas en todas las direcciones, a diferencia que los compuestos reforzados con fibras ya que estos poseen características anisotrópicas, mostrando diferente resistencia en la dirección que se observe. Tanto las partículas como las fibras se pueden emplear en diferentes dimensiones pueden ser largas (continuas) o cortas (discontinuas) dependiendo de la función que se requiera, las partículas o fibras cortas disponen de bajas propiedades mecánicas, por ser cortas la matriz presenta insuficiencia para transmitir las cargas al refuerzo. Por ende, si se necesita propiedad mecánica de altas prestaciones es recomendable implementar fibras largas (Pérez, 2014)

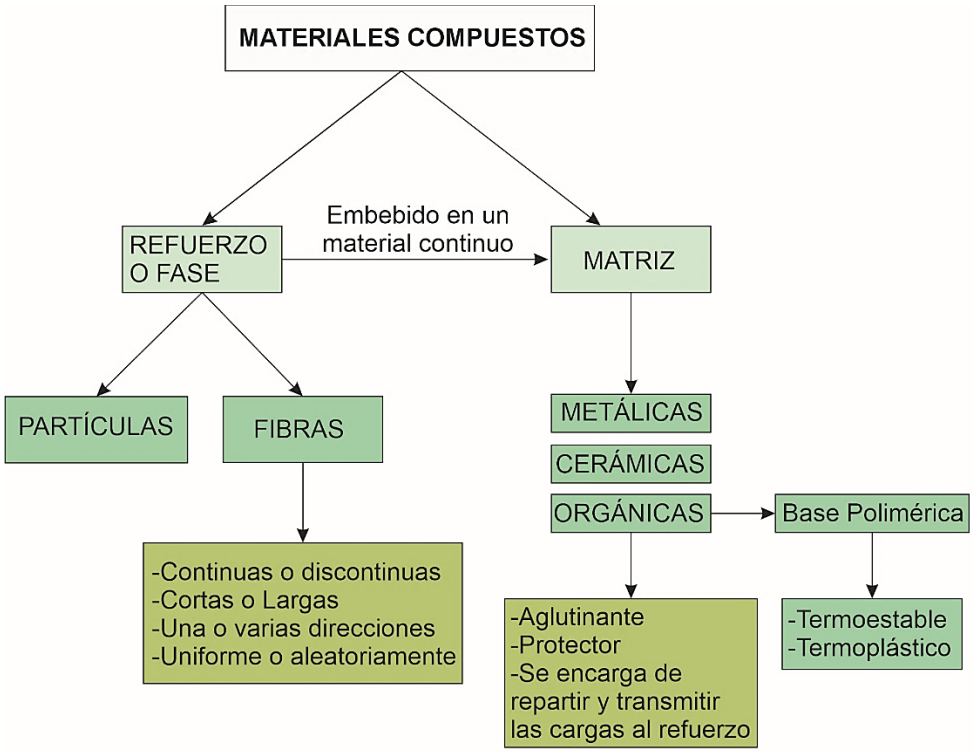


Ilustración 7.Esquema de materiales compuestos

Fuente: Elaboración propia

Los materiales compuestos en el sector de la construcción se están empleado cada vez más por su baja densidad y sus altas prestaciones mecánicas respecto a otros materiales convencionales.

Tienen una alta aplicabilidad en construcciones con diseños complejos que solo podrían realizarse con materiales compuestos por su bajo peso y su capacidad de moldeo en diferentes formas, ofreciendo una serie de beneficios a las construcciones como anticorrosivo, durable, estable, flexible, con baja conductividad térmica y con alta resistencia mecánica.

Existen diferentes aplicaciones para los materiales compuestos como su utilización en las edificaciones, un gran ejemplo de este es el edificio Glasgow Science Tower (Escocia, 1992). la torre con una altura aproximada de 127 M, pesa alrededor de 220 toneladas, siendo la única estructura en el mundo de rotar 360º sobre una base gigantesca, fabricada la parte superior en fibra de vidrio por densidad y en fibra de carbono el mástil.(Roca Ramon, 2005)

Ilustración 8. Glasgow Science Tower

Fuente: tomado de https://news.stv.tv/west-central/glasgow-tower-at-citys-science-centre-reopens-to-the-public-for-first-time-in-almost-four-years

2.2.2 Material compuesto de matriz orgánica polimérica termoplástica.

Los materiales compuestos de matriz orgánica polimérica se clasifican en termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos poseen la característica de poder moldearse mediante calor, adquiriendo cualquier forma deseada al enfriarse, con el gran beneficio de realizar este procedimiento muchas veces sin que se afecte o dañe el material, adicionalmente cuenta con excelentes propiedades técnicas como altas prestaciones mecánicas, resistencia al desgarre, buena elasticidad y resistencia a agentes químicos, propiedades que otros polímeros no contienen. Los termoplásticos más usados son el polipropileno, poliestireno, poliuretano, policarbonato y el polietileno. Por otro lado, los polímeros termoestables a diferencia de los termoplásticos no contienen la propiedad de fundirse con la temperatura, perdiendo la capacidad de reutilización una vez haya tomado su forma, los más utilizados en la industria son: las aminas, el poliéster, los epoxis, los uretanos y las siliconas. (Cely & Prieto, 2014)

2.2.3 Normativa de la madera plástica (WPC)

Actualmente en Colombia no se ha profundizado en investigaciones ni estudios sobre la madera plástica como elemento estructural. Por este motivo se desconocen las grandes propiedades que la WPC presenta, ocasionando que el país se quede sin insumos para implementar normativa con el fin de utilizar este material en la construcción. Sin embargo, otros países si han avanzado en la profundización y estandarización de este material.

La American Society For Testing And Materials (ASTM) generó una serie de normativas y estandarizaciones para el uso de la madera plástica de polietileno reforzado, en elementos estructurales que se mencionan a continuación:

ASTM D695: RESISTENCIA A ESFUERZO DE COMPRESIÓN

ASTM D790: RESISTENCIA A ESFUERZO DE FLEXIÓN

ASTM D638: RESISTENCIA A ESFUERZOS DE TENSIÓN

ASTM D732: RESISTENCIA A ESFUERZOS DE CORTANTE

Adicionalmente, la madera plástica está sometida a una serie de ensayos de resistencia bajo la norma ASTM-D143, la cual debe cumplir con requerimientos y lineamientos para su uso. (Contreras Pérez et al., 2020)

2.3 Materiales (Análisis del material compuesto a emplearse)

2.3.1 Polietileno de alta densidad (HDPE)

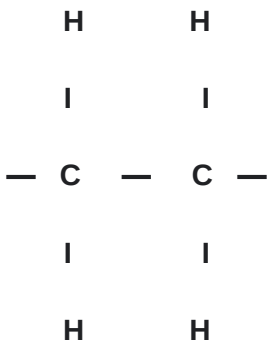
El polietileno de alta densidad, siglas en inglés (HDPE o *High Density Polyethylene*) o siglas en español (PEAD o Polietileno de Alta Densidad), es un polímero termoplástico que se obtiene de la polimerización del etileno a bajas temperaturas y presiones, posee un peso molecular que se encuentra entre 200.000 y 500.000. Es un material relativamente cristalino, dispone de gran dureza y fuerza por su cadena lineal que presenta muy pocas ramificaciones, sus principales métodos de transformación es por medio de extrusión.

Posee grandes propiedades de rigidez y resistencia, con una densidad entre 0.940 – 0.954 gr/cm^3. La estructura no polar (hidrofóbica) impide que pase la humedad al interior generando alta resistencia a ataques de agentes químicos, Adicionalmente es un material muy tenaz pudiendo resistir grandes impactos, absorbiendo la energía presentada mediante la deformación (Roca Girón, 2005), se puede encontrar en envases de detergentes, botellas y bolsas.

Formula molecular:

$$(C_2H_4)_n$$

Formula química:



Polietileno de alta densidad	
Módulo elástico:	1.07 - 1.09 GPa
Coeficiente de Poisson:	0.41 - 0.427
Resistencia mecánica a la compresión:	18.6 - 24.8 MPa
Resistencia mecánica a la flexión:	30.9 - 43.4 MPa
Resistencia mecánica a la tracción:	22.1 - 31 MPa
Tenacidad a fractura (KIc):	1.52 - 1.82 MPa·$m^{1/2}$

Tabla 1. Propiedades mecánicas del HDPE

Fuente: tomado de http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polietileno-de-alta-densidad

El polietileno de alta densidad es uno de los polímeros con menor densidad siendo beneficioso a la hora de implementarlo en la construcción, y aunque el polipropileno (PP) se comporta mejor a esfuerzos mecánicos, con mayor resistencia y rigidez, requiere mayor cantidad de energía para su transformación después de su reciclaje, delimitándolo como un material inviable para su utilización, por el contrario el HDPE o PEAD cubre con todas las propiedades y requerimientos para su utilización post-reciclaje en la construcción (Salcedo Cortés, 2015)

Material	Densidad (g/cm^3)		Módulo (kg/cm^2)		Esfuerzo máx. (kg/cm^2)		Elongación a rotura (%)		Fuerza impacto (kg-cm/cm)	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
PP	0.90	0.91	11,216.70	16,315.20	316.11	418.08	100.00	600.00	16.33	
PEBD	0.92	0.93	1,733.49	2,855.16	91.77	147.86	100.00	650.00	No rompe	
PEAD	0.95	0.97	10,808.82	11,114.73	224.33	316.11	10.00	12.00	2.18	217.73
PS	1.04	1.05	23,453.10	33,650.10	367.09	530.24	1.00	1.50	2.18	2.45
Nylon 6.6	1.13	1.15			774.97	846.35	60.00	300.00	4.35	11.43
PMMA	1.17	1.20	22,433.40	31,610.70	489.46	774.97	2.00	10.00	1.63	3.27
PC	1.20		24,472.80		673.00		110.00		87.09	
Fenol-formal	1.24	1.32	28,551.60	48,945.60	346.70	632.21	1.50	2.00	1.09	21.77
PVC	1.30	1.58	24,472.80	41,807.70	418.08	530.24	40.00	80.00	2.18	108.86
PET	1.34	1.39	28,551.60	41,807.70	601.62	734.18	50.00	300.00	1.09	4.35
Teflón	2.14	2.20	4,078.80	5,608.35	142.76	346.70	200.00	400.00	2.18	5.44

Tabla 2. Propiedades de los polímeros más comunes

Fuente: tomado de (Salcedo Cortés, 2015)

2.3.2 Fibra de Pino Romerón (Retrophyllum rospigliosii)

Colombia, un país tropical, alberga una gran biodiversidad de flora y fauna gracias a su variedad de ecosistemas, que incluyen selvas, páramos, desiertos y costas. Lamentablemente, mucha de esta flora se encuentra amenazada por la recolección excesiva, la deforestación, la tala ilegal, la ganadería extensiva y el cambio climático, lo que ha reducido considerablemente su hábitat. Para abordar esta problemática, se han puesto en marcha estrategias de reforestación con el objetivo de preservar el entorno natural y su diversidad de especies.

El Pino Romerón es una conífera nativa que se encuentra ubicada en la cordillera central y oriental entre 1550 y 3750 msnm con gran valor para la reforestación y alta producción de madera fina para la construcción. Siendo una de las pocas especies que ha podido destacar en crecimiento rápido y capacidad de adaptación ayudando a la recuperación de suelos erosionados y cuencas hídricas. La plantación de estos árboles contribuye a mantener la cobertura vegetal y, una vez alcanzan su crecimiento óptimo, pueden ser aprovechados como especie maderable. (Cueva Márquez et al., 2013),

Pino Romerón (Retrophyllum rospigliosii)	
Familia	Podocarpaceae
Genero	Retrophyllum
Altura máx.	45 m
Diámetro	1m – 2m
Temperatura min	4ºC
Temperatura máx.	20ºC
Suelo	PH. 4-5
Sin nudos	20t -28m
Madera	Café oscuro
Corteza escamosa	Gris
Hojas longitud	8mm-14mm
Hojas ancho	3mm – 5mm
Longevidad	>60 Años

Tabla 3. Características del Pino Romerón

Ilustración 9. Árbol de Retrophyllum rospigliosii

Fuente: tomado de (Cueva Márquez et al., 2013)

Propiedades físicas y mecánicas del Pino Romerón

Propiedades Físicas:

Densidad				**Contracción Normal**			
Verde g/cm^3	Seca al aire	Anhidra	Básica	Radial	Tang.	Volumen	Relación CT/CR
0.91	0.68	0.64	0.57	1.6	3.2	4.8	2.0

Contracción Total			
Radial	Tang.	Volumen	Relación CT/CR
3.2	5.7	8.7	1.9

Tabla 4. Propiedades Físicas Pino Romerón

Fuente: tomado de (Arévalo Fuentes & londoño, 2005)

Propiedad Mecánicas:

Contenido de humedad (%)	Densidad básica g/cm^3	Cizallamiento Kg/cm^2	Impacto Kg-m
Verde	0.57	103	3.64
12%	0.7	116	2.05

Flexión estática			Compresión		Dureza	
Esfuerzo fibras al límite propor kg/cm$^{2.}$	Módulo de ruptura kg/cm^2.	Módulo de elasticidad t/cm^2	Paralela máxima resistencia kg/cm^2	Perpendicular resistencia al límite propor. kg/cm^2	Extremos kg	Lados kg
266	604	73	338	69	494	472
423	1016	96	473	86	677	452

Esfuerzos admisibles (kg/cm2)					Módulo de elasticidad	
Flexión fm	Compresión paralela a las fibras fc	Compresión perpendicular a las fibras Fc t	Corte fv	Tracción paralela a las fibras ft	Emin Kg/cm^2	Eprom Kg/cm^2
150	110	28	12	105	75.000	100.000

Tabla 5. Propiedades Mecánicas Pino Romerón

Fuente: tomado de (Arévalo Fuentes & londoño, 2005)

Las propiedades mecánicas y físicas mencionadas en las tablas 4 y 5 hacen que esta especie de madera sea una elección óptima para esta investigación. Es crucial destacar que se necesitan cantidades mínimas de este material, ya que se empleará exclusivamente como fibras de refuerzo para el compuesto, evitando así la necesidad de realizar grandes deforestaciones en los cultivos de árboles.

El uso de esta madera en forma de fibras de refuerzo para los materiales compuestos permite aprovechar sus características deseables sin comprometer en gran medida la cantidad de recursos naturales empleados. Esto es beneficioso para la sostenibilidad ambiental, ya que se reduce el impacto en los bosques y se optimiza el uso de este recurso natural de manera más eficiente.

2.3.3 Fibra de vidrio como refuerzo

Las fibras de refuerzo son las que le brindan rigidez y resistencia a la estructura además de muchas de las propiedades mecánicas del material compuesto, tal como dice (Iglesias et al., 2017) las características más importantes son su resistencia a la tracción y su elevado módulo específico, propiedades que se manifiestan en su dirección longitudinal.

Las fibras de vidrio son utilizadas generalmente para reforzar matrices plásticas, “combina la alta resistencia de la

s delgadas fibras de vidrio con la ductilidad y la resistencia química del plástico” (Ramos-Tino, 2010). Las fibras de vidrio se producen a través de vidrio fundido de hileras de gravedad, estiradas aun calientes por bobinados a alta velocidad. Este material tiene gran producción en el país por su bajo costo, además que las materias primas para su fabricación y su proceso de ejecución es mucho más sencillo que otras fibras del mercado como las fibras de carbono, siendo un material muy accesible. (Alvarado T. María Paula et al., 2021), al utilizar las fibras de vidrio se debe tener en cuenta el método de fabricación, el tipo, la forma y la orientación en la que se insertará la fibra en la matriz, esto con el fin de optimizar y elevar todas las propiedades de la fibra. Las fibras de vidrio continuas (fibras largas) son aquellas que miden más de 1cm de longitud (10-15mm), presentando optimas características mecánicas para su uso en estructuras, muy superiores a las fibras discontinuas (fibras cortas). (Iglesias et al., 2017)

Existen diferentes tipos de fibras de vidrio, sin embargo, las más conocidas por sus grandes prestaciones son: el vidrio dieléctrico o tipo D, el vidrio álcali resistente (AR), el vidrio químico o tipo C, el vidrio boro o tipo B, el vidrio ERC, el vidrio eléctrico o tipo E, y el vidrio tipo X.

Los dos tipos de fibra de vidrio más utilizados para materiales compuestos son los Tipo E o eléctrico y los tipos S de alta resistencia, Los vidrios tipo E tienen en su composición

borosilicato de calcio y aluminio siendo los más utilizados en la producción de fibras largas o continuas, con una densidad de 2540 kg/m^3, un módulo de elasticidad de 738000 kg/m^2 y un módulo de corte de 306000 kg/$m^{2.}$

Propiedades Mecánicas Fibra de Vidrio Tipo E	Unidad	Valor
Densidad	Kg/cm^3	2540
Resistencia a la tracción	MPa	521
Coeficiente de Poisson	-	0.2
Módulo de elasticidad	Kg/cm^2	738000
Módulo de corte	Kg/cm^2	306000

Tabla 6. Propiedades Mecánicas Fibra de Vidrio Tipo E

Fuente: Elaboración propia

2.3.4 Paja como material de relleno del muro prefabricado

Para combatir con la problemática ambiental que actualmente se está presentado en el mundo, se busca implementar nuevas alternativas sostenibles que ayuden a la conservación del medio ambiente y los recursos naturales, con la aplicación de nuevos materiales eco-sostenibles que puedan reemplazar los convencionales.

La aplicación de residuos agrícolas como las balas de pajas en la construcción es una solución eficiente y eficaz para la protección del medio ambiente por ser un producto reciclable y además renovable. Este material surgió en Nebraska, en el momento en que los agricultores empezaron a implementar maquinaria embaladora para recoger los residuos después de la cosecha, convirtiéndolos en bloques compactos. Los pobladores por falta de materiales convencionales empezaron a utilizar estos bloques de paja como solución alterna, resultando ser construcciones económicas, rápidas y duraderas. (Romans Torres, 2015)

La paja es un material con gran capacidad térmica, acústica y estructural, además de tener ahorros energéticos hasta del 60% con una huella ecológica mínima. Los fardos de paja pueden soportar 900kg/m y los bloques de paja de alta densidad compactados por

máquinas, están diseñados para soportar hasta casi 6000 kg/m, además de ahorrar casi un 75% en costos de calefacción y refrigeración (Souza, 2020),

Colombia cuenta con el gran beneficio de ser un país altamente agrícola, representando una de las principales fuentes económicas con producciones de cultivos como el trigo, el arroz y la cebada en regiones como Boyacá, Cundinamarca, Nariño, Valle y Caldas. Este material es renovable y está disponible en grandes cantidades además de que no tiene otro uso, pero si generan una gran problemática a la hora de desecharlos ya que estos residuos que deja la cosecha se queman a cielo abierto generando partículas que conllevan al deterioro del medio ambiente produciendo emisiones Metano (CH_4), Monóxido de carbono (CO), Bióxido de nitrógeno (NO_2), hidrocarburos (CnH_2n+2) y partículas menores a 10 micras (PM10), además de ocasionar problemas en la salud de la población como enfermedades respiratorias por el monóxido de carbono liberado en la quema (CO). (García-Velázquez, Amado-Moreno, Campbell-Ramírez, et al., 2013), Según la tabla 8, se puede observar que la paja de trigo produce la mayor cantidad de residuos tóxicos por hectárea siendo un gran contaminante para el medio ambiente, por ende, esta investigación busca reciclar y utilizar este material agrícola implementándolo en la construcción para alargar su ciclo de vida además de reducir el impacto ambiental que se genera por la quema del mismo.

Cultivo	Hectáreas (Ha)	Factor de carga Tonelada por Hectárea (FC/Ha*)	Monóxido de carbono (CO)	Hidrocarburos (HC**)	Partículas menores (PM)	Bióxido de nitrógeno (NO_2)
Cebada	141.869	4.5	303.0	29.0	42.50	10.50
Maíz	88.148	10.25	514.75	57.25	66.75	20.00
Trigo	273.643	4.75	233.00	19.50	28.00	8.75

Tabla 7. Cantidad en kg de contaminantes emitidos en la quema por hectárea.

Fuente: tomado de (García-Velázquez, Amado-Moreno, Campbell-Ramírez, et al., 2013) *de (Quintero, 2008)*

2.3.5 Madera plástica (WPC): matriz de Polietileno de alta densidad (HDPE) + Fibras de madera de pino romerón

Como se nombró en el apartado 2.1.9, la matriz de un material compuesto puede ser termoplástica o termoestable. Para este proyecto se utilizará matriz polimérica termoplástica de polietileno de alta densidad (HDPE), se implementará por su bajo costo y óptimas propiedades mecánicas y físicas, además de su buen comportamiento ante temperaturas elevadas. Tomando cualquier forma al alcanzar temperaturas de fusión entre 120ºc y 135ºc, es el plástico más común en el mundo, caracterizándose por la capacidad de reciclaje, siendo este el objetivo principal de este documento.

Propiedades Mecánicas HDPE	Unidad	Valor
Densidad	Kg/cm^3	958
Contracción	%	1.5-3
Resistencia a la tracción	MPa	15-40
Coeficiente de Poisson	-	0.46
Esfuerzo a compresión	MPa	31.7
Módulo de compresión	GPa	0.689
Módulo de flexión	Psi	125.000
Módulo de elasticidad	Psi	105.000
Coeficiente de fricción	-	0.29

Tabla 8. Propiedades Mecánicas del HDPE

Fuente: Elaboración propia

A la matriz polimérica de HDPE, se le incorporarán fibras de madera de pino romerón, dado que al tener una estructura de lignocelulosa puede modificar y elevar las propiedades mecánicas del HDPE como la rigidez, la resistencia a la tensión, a la flexión y al impacto del polímero, sin embargo, la estructura del HDPE es hidrofóbica a diferencia de la madera que es hidrofílica, ocasionando que así se agreguen las fibras no habrá una buena transferencia de esfuerzos desde la matriz hasta las fibras. La interrelación entre estos dos materiales determinará el buen desempeño del producto. Por ende, es recomendable el uso de agentes de acople como aglutinante para que la matriz de HDPE se pueda adherir

completamente a la fibra de madera. El agente de acople más utilizado es el ANHIDRICO MALEICO, además en algunos casos si se requiere, se pueden añadir diferentes aditivos como pigmentos, lubricantes o antimicrobianos. (Vargas Isaza et al., 2022). La estructura ideal de agente de acoplamiento y aditivos es del 3% para cada uno (Bhaskar et al., 2021). Este nuevo compuesto de matriz de HDPE y fibras de madera se le denomina MADERA PLASTICA o en ingles Wood plastic composite (WPC). La madera plástica puede ser combinada adicionalmente con refuerzos como la fibra de vidrio para obtener propiedades mecánicas superiores.

Propiedades Mecánicas Pino Romerón	**Unidad**	**Valor**
Densidad	Kg/cm^3	680
Resistencia a la tracción	Kg/cm^2	105
Coeficiente de Poisson	-	0.54
Esfuerzo a compresión	Kg/cm^2	110
Módulo de elasticidad	kg/cm^2	75000
Cizallamiento	kg/cm^2	116
Impacto	kg/m	2.05
Módulo de corte	Kg/cm^2	12

Tabla 9. Propiedades Mecánicas Pino romerón

Fuente: Elaboración propia

Según la Tesis Madera plástica de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) reciclado como material estructural Presentada por (Salcedo Cortés, 2015), la madera plástica presenta un esfuerzo a tensión último de 100 kg/cm^2 a 120 kg/cm^2 sin reforzarlo con fibras. Con una deformación entre 600% y 800% del tamaño de la sección.

	Madera natural	Madera plástica	
		-23.3°C	40.6°C
Resistencias a esfuerzos de compresión kg/m²	193.743 – 275.319	528.204	116.246
Módulo kg/cm²	81,577.296 – 112,168.782	17,335.175	2,753.234
Resistencias a esfuerzos de flexión kg/cm²	407.880	373.210	90.141
Módulo kg/cm²	81,577.296 – 112,168.782	22,535.728	5,098.581
Resistencias a esfuerzos de tensión kg/cm²	407.88 – 540.441	206.999	117.265
Módulo kg/cm²	81,577.296 – 112,168.782	19,272.636	4486.751
Resistencias a esfuerzos de cortante kg/cm²	50.985 – 71.379	116.246	95.342

Tabla 10. Resistencia a esfuerzos de la madera natural vs madera plástica

Fuente: tomado de (Salcedo Cortés, 2015)

Los valores de resistencia en temperaturas frías fueron más estables que los obtenidos a altas temperaturas presentando mayor resistencia. La madera plástica que fue probada en la investigación puede tener la capacidad de ser utilizada estructuralmente, asimismo, puede ser manejada del mismo modo que la madera natural, se presta para ser cortada, clavada y moldurada dejando acabados finos y suaves. (Salcedo Cortés, 2015)

Por otro lado, en la investigación Desempeño Mecánico de compuestos de madera plástica de matriz poliolefínica realizada por (Vargas Isaza et al., 2022), se presenta una comparación entre diferentes autores que estudian el comportamiento mecánico de la madera plástica, los resultados se recopilan en las siguientes tablas:

% Madera	Resistencia a la tensión [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Ref.
50	-	19,2	(Pritchard, 2004)
0	11		
10	14,9	-	(Solis & Lisperguer, 2005)
20	11,3		
40	-	23,9	(Bengtsson & Oksman, 2006)
30	15,9	24,3	
40	13,7	20	
50	12,3	15,6	(Adhikary et al., 2008)
10	26,5		
20	25	-	(Wolcott & Englund, 1999)
30	19		
40	15		
30	22,3	-	(Lai et al., 2003)
10	20,5		
30	20,3	-	(Lu et al., 2005)
50	14,3		
70	7,45		
40	12	34,1	(Afrifah et al., 2010)

Tabla 11. Resistencia a la tensión y flexión de los compuestos de madera plástica en HDPE sin modificación en la matriz o madera.

Fuente: tomado de (Vargas Isaza et al., 2022)

% Madera	Resistencia a la tensión [MPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Ref.
40	-	50,3	(Faruk & Matuana, 2008)
10	23,8	23	
20	25,1	24,5	(Semeralul, 2009)
30	25,2	31,1	
40	-	43,2	(Bengtsson & Oksman, 2006)
40	19,3	29,4	(Adhikary et al., 2008)
50	17,5	24,2	
30	29	34	
40	27	33	(García et al., 2009)
50	27	35	
30	28,2	42,7	(Lee et al., 2010)
10	23,7	43	(Lei & Wu, 2012)
40	22,1	40,5	(Lei & Wu, 2010)

Tabla 12. Resistencia a la tensión y flexión de los compuestos de madera plástica en HDPE empleando agentes de Acople

Fuente: tomado de (Vargas Isaza et al., 2022)

% Madera	Módulo a tensión [GPa]	Módulo a flexión [GPa]	Ref.
40	-	2,17	(Faruk & Matuana, 2008)
40	1,09	1,38	(Migneault et al., 2015)
40	-	2,1	(Bengtsson & Oksman, 2006)
40	2,35	1,8	(Adhikary et al., 2008)
50	1,9	1,88	
30	4,15	2,4	(García et al., 2009)
40	5,9	3,1	
50	7,3	3,8	
30	1,32	1,64	(Lee et al., 2010)
40	2,27	1,19	(Lei & Wu, 2012)
40	2,68	2,64	(Lei & Wu, 2010)

Tabla 13. Módulos a tensión y flexión de los compuestos de madera plástica en HDPE empleando agentes de acople.

Fuente: tomado de (Vargas Isaza et al., 2022)

De las cuales se puede concluir que: en la tabla 11 el aumento de fibra o polvos de madera empleada en la matriz de HDPE puede contribuir o inhibir las características mecánicas de la madera plástica, si no hay uso de agentes de acople. Los autores muestran diferentes porcentajes de madera incorporadas en la matriz de HDPE obteniendo una reducción en la resistencia a la tensión y a la flexión mientras más se añade fibra de madera, esto debido la ausencia de agentes de acople que permiten el buen funcionamiento de esto dos componentes.

En la Tabla 12 y 13, por el contrario, se muestra el cambio de las propiedades mecánicas de la WPC al incorporar agentes de acople, manteniendo valores más estables en la resistencia a la tensión y en el módulo de rigidez. (Vargas Isaza et al., 2022)

Los autores (Vargas Isaza et al., 2022) exponen en la Tabla 14 la resistencia y el módulo de flexión con diferentes tipos de fibras de maderas empleadas en la matriz de HDPE con una proporción de 60/40, concluyendo que con la utilización de madera de pino se obtienen mejores resultados en la resistencia y el módulo de flexión. Lo anterior debido a la cantidad de celulosa que contiene esta madera facilitando que el agente de acople actúe satisfactoriamente. (Vargas Isaza et al., 2022)

Matriz / Madera	Resistencia a flexión [MPa]	Módulo a flexión [GPa]	Ref.
PEAD / Abeto y pino	29,6	3	(Bengtsson & Oksman, 2006)
PEAD / Especies de arce de madera dura	28,9	1,92	(Faruk & Matuana, 2008)
PEAD / Pino radiata	17,9	1,06	(Adhikary et al., 2008)
PEAD / Harina de pino	40,5	2,64	(Lei & Wu, 2010)
PEAD / Harina de pino	39	2,1	(Lei & Wu, 2012)

Tabla 14. Resistencia y módulo de flexión de compuestos de madera plástica en HDPE/PEAD comparando diferentes tipos de madera a un 40% de contenido.

Fuente: tomado de (Vargas Isaza et al., 2022)

El artículo de (Adhikary et al., 2008) investiga la estabilidad, las propiedades mecánicas y la microestructura de los compuestos de madera y plástico que se fabrican utilizando HDPE con harina de madera de pino Radiata. el HDPE utilizado fue conseguido de plantas de reciclaje posconsumo y los polvos de madera de un aserradero local. Realizaron 10 ensayos y pruebas con diferentes porcentajes de HDPE y de madera, además a algunos de estos ensayos le agregaron agente de acoplamiento de polipropileno maleado de polímero grado Epolene G-3015 con una densidad aparente de 913 kg/m^3.

Composite sample code	HDPE type	HDPE content	Wood flour content	Coupling agent content
vHDPE100	Virgin	100	0	0
rHDPE100	Recycled	100	0	0
vHDPE60W40	Virgin	60	40	0
rHDPE70W30	Recycled	70	30	0
rHDPE60W40	Recycled	60	40	0
vHDPE50W50	Virgin	50	50	0
rHDE50W50	Recycled	50	50	0
rHDPE47W50CA3	Recycled	47	50	3
rHDPE45W50CA5	Recycled	45	50	5
rHDPE57W40CA3	Recycled	57	40	3

Tabla 15. Formulaciones de compuestos de madera y plástico

Fuente: tomado de (Adhikary et al., 2008)

El primer ensayo fue de estabilidad dimensional (absorción de agua y de hinchamiento del espesor) realizado bajo la norma american society for testing and materials (ASTM D570-98). Para esta prueba las muestras se sumergieron en agua durante 24 horas, se tomaron diferentes ensayos, posteriormente fueron secadas en horno a 105ºC durante otras 24 horas para tomar los ensayos faltantes.

Se evidenció que la absorción del agua crece al aumentar el porcentaje de madera, pero si se incrementa el porcentaje de plástico automáticamente se genera menos absorción de agua.

Código de muestra compuesto	Densidad (kg/m3)	Absorción de humedad (%)		Hinchazón del espesor (%)	
		2 horas	24 horas	2 horas	24 horas
vHDPE100	930 (61a)	0,03 (0,01)	0,05 (0,02)	0,08 (0,02)	0,13 (0,02)
rHDPE100	923 (13)	0,04 (0,01)	0,05 (0,01)	0,18 (0,05)	0,18 (0,05)
vHDPE60W40	946 (26)	1,28 (0,12)	2,67 (0,27)	0,5 (0,1)	0,83 (0,2)
rHDPE70W30	981 (19)	0,39 (0,06)	0,98 (0,17)	0,24 (0,08)	0,42 (0,35)
rHDPE60W40	1000 (21)	0,94 (0,19)	2,15 (0,45)	0,52 (0,14)	1,52 (0,37)
vHDPE50W50	938 (24)	2,76 (0,5)	6,84 (1,32)	1,26 (1,14)	2,5 (0,7)
rHDPE50W50	1010 (20)	1,7 (0,08)	4,1 (0,25)	0,7 (0,28)	1,85 (0,4)
rHDPE47W50CA3	1042 (15)	0,61 (0,12)	1,31 (0,3)	0,27 (0,04)	0,64 (0,2)
rHDPE45W50CA5	1029 (25)	0,53 (0,08)	1,18 (0,21)	0,33 (0,14)	0,62 (0,4)
rHDPE57W40CA3	997 (22)	0,58 (0,15)	1,24 (0,24)	0,23 (0,17)	0,51 (0,2)

Tabla 16. Absorción de agua e hinchamiento del espesor de compuestos de HDPE y harina de madera.

Fuente: tomado de (Adhikary et al., 2008)

Para las mediciones mecánicas, los investigadores tomaron pruebas de tracción bajo la norma ASTM D638-99 y pruebas de flexión con la norma ASTMD790. La resistencia a la tracción para los compuestos de madera y HDPE se encuentran entre 9.5 y 23.2 MPa. Se puede observar que los compuestos de HDPE reciclado (rHDPE) manejan mayor resistencia a la tracción que los compuestos de HDPE virgen (vHDPE), también se evidencia que los compuestos a los que se le aplican 40 o 50% de harina de madera con adición de agente de acople tienen mayor resistencia a la tracción y rigidez.

Composite sample code	Tensile properties				Flexural properties			
	Strength (MPa)	MOE (GPa)	Yield stress (MPa)	Fracture strain (%)	Strength (MPa)	MOE (GPa)	Yield stress (MPa)	Max. strain (%)
vHDPE100	21.4 (3.1[a])	–	–	–	22.4 (0.8)	0.84 (0.03)	10.2 (0.9)	8.1 (0.5)
rHDPE100	23.2 (0.2)	–	–	–	23.1 (0.5)	0.84 (0.05)	9.2 (0.5)	7.6 (0.2)
vHDPE60W40	11.8 (1.1)	1.64 (0.09)	5.1 (0.6)	1.9 (0.4)	17.9 (0.9)	1.06 (0.05)	8.5 (0.4)	3.9 (0.3)
rHDPE70W30	15.9 (0.8)	1.37 (0.04)	8.5 (0.3)	2.6 (0.8)	24.3 (0.8)	1.29 (0.08)	13.1 (0.7)	4.5 (0.5)
rHDPE60W40	13.7 (0.7)	1.7 (0.1)	6.3 (0.3)	1.7 (0.4)	20 (0.4)	1.13 (0.04)	9.4 (0.2)	3.4 (0.3)
vHDPE50W50	9.5 (0.4)	1.68 (0.07)	5.2 (0.6)	1.1 (0.3)	14.4 (1.5)	1.34 (0.03)	6.2 (0.2)	2.6 (0.3)
rHDPE50W50	12.3 (2.1)	1.7 (0.04)	7.1 (0.7)	1.5 (0.2)	15.6 (1.5)	1.42 (0.04)	6.8 (0.8)	2.2 (0.4)
rHDPE47W50CA3	18.3 (0.4)	2.18 (0.09)	11.9 (0.4)	1.2 (0.1)	25.5 (1.0)	1.88 (0.03)	11.8 (0.5)	2.3 (0.2)
rHDPE45W50CA5	17.5 (2.1)	1.9 (0.05)	11.8 (0.8)	1.1 (0.2)	24.2 (1.8)	1.97 (0.03)	11.2 (0.8)	2.0 (0.3)
rHDPE57W40CA3	19.3 (0.8)	2.35 (0.06)	11.4 (1.2)	1.5 (0.2)	24.9 (1.3)	1.81 (0.04)	10.2 (1)	2.6 (0.1)

Tabla 17. Propiedades mecánicas de HDPE y harina de madera.

Fuente: tomado de (Adhikary et al., 2008)

En el módulo de Young (MOE) para esfuerzos a tensión sin aplicar agente de acoplamiento, oscilan rangos entre 1.37 y 1.7 GPa pero si les aplica agente de acoplamiento están entre 2.18 y 2.35 GPa,

Los compuestos de HDPE reciclado que incluye harina de madera poseen una resistencia a la flexión entre 15,6 a 25,5 MPa lo que los hace superiores a los HDPE virgen con la misma proporción de plástico y harina de madera.

Para finalizar, esta investigación concluye que los HDPE reciclados son similares o en muchas ocasiones pueden llegar a tener propiedades mecánicas mejores que los HDPE virgen, además los resultados demuestran que utilizar HDPE reciclado y harina de madera puede producir madera plástica resistente y estable y si se requiere aumentar aún más las propiedades mecánicas del producto para su utilización en la construcción, se puede añadir agentes de acoplamiento.

En la investigación realizada por (dos Santos et al., 2018) se puede evidenciar el cambio en las propiedades de la madera plástica según el compuesto que se le agregue ya sea de fibra de vidrio o de madera. En la tabla 18 se muestra que al agregar fibra de vidrio y fibra de madera aumenta 2090 MPa el módulo de tracción.

Composición (% en peso)		Módulo de tracción (MPa)
Fibra de vidrio	Fibra de madera	
0	0	810
25	0	2310
0	8	980
25	8	2900

Tabla 18. Módulo de tracción de madera plástica de HDPE reforzado con fibra de vidrio y/o fibra de madera

Fuente: (dos Santos et al., 2018)

2.4 Panel prefabricado de madera natural con relleno de paja elaborado por la empresa EcoCocon

EcoCocon es una empresa dedicada a la construcción ecológica y sostenible, con la visión de crear estructuras duraderas que, al llegar al final de su vida útil, puedan reintegrarse a la naturaleza sin dejar ningún tipo de contaminación. Para lograr este objetivo, ha

desarrollado un innovador sistema constructivo modular basado en paneles compuestos en un 89% de paja y un 10% de madera natural.

Con construcciones de más de 2000m^2 de muros en EcoCocon, ha logrado capturar alrededor de 1500 toneladas métricas de CO_2, este nuevo sistema está compuesto por 98% de materiales renovables ofreciendo un excelente desempeño térmico, con una capacidad de secuestro de 97.6 kg de CO2 por m^2 de panel. Además, cuenta con certificaciones Passivhaus, un estándar para la construcción sostenibles, diseñadas para mantener condiciones atmosféricas ideales en el interior de las estructuras, lo que se traduce en un menor consumo energético. También ha obtenido la certificación Cradle to Cradle, otorgada por una organización dedicada a promover la producción de materiales más sostenibles y eficaces. Estas características hacen del sistema EcoCocon una elección económica y ecológica para la construcción.

CARACTERISTICAS DEL PANEL DE 40MM DE ANCHO	
Valor de U	0.123 W/m^2 -K
Conductividad térmica	0.0645 W/mK
Resistencia al fuego	120 minutos
Inflamabilidad	B-s1, d0
Aislamiento al ruido aéreo	54dB
Capacidad de carga vertical	Hasta 110 kN/m*
Precisión	2mm en 3m de longitud*
Densidad media de la paja	110kg/m^3*
CO2 emitido en producción	2.8kg/m^2*
CO2 secuestrado	97.6 kilos/m^2*
Tiempo de ensamblaje	20-40 minutos por m^2*
Peso	63kg/m2

Tabla 19. Características del panel 40m

Fuente: elaboración propia con información tomada de (EcoCocon s.r.o, 2008)

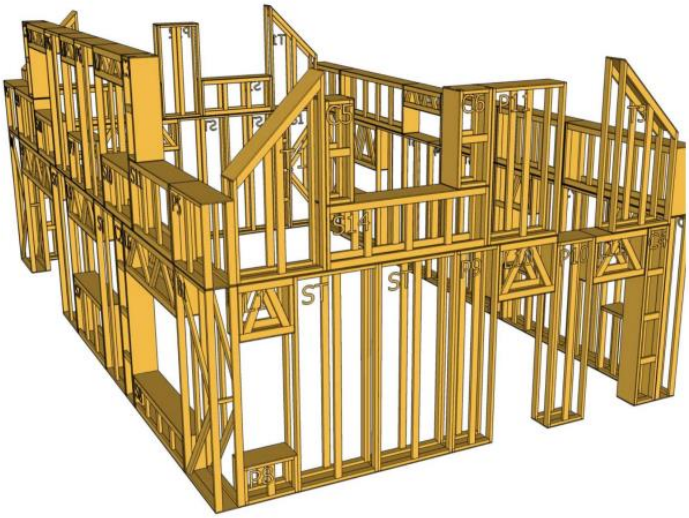


Ilustración 10. Estructura del panel madera natural

Fuente: tomado de (EcoCocon s.r.o, 2008)

Ilustración 11. Estructura madera natural con relleno de paja

Fuente: tomado de (EcoCocon s.r.o, 2008)

I. Refuerzos horizontales contra pandeo

El panel de EcoCocon de 850 mm x 400mm tiene 3 láminas de refuerzo contra el pandeo

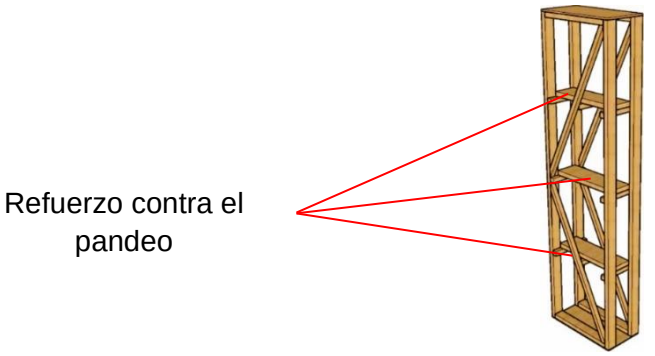


Ilustración 12. Refuerzos horizontales contra pandeo

Fuente: Elaboración propia con referencia de (EcoCocon s.r.o, 2008)

II. Método de conexión con tornillos para unir dos paneles

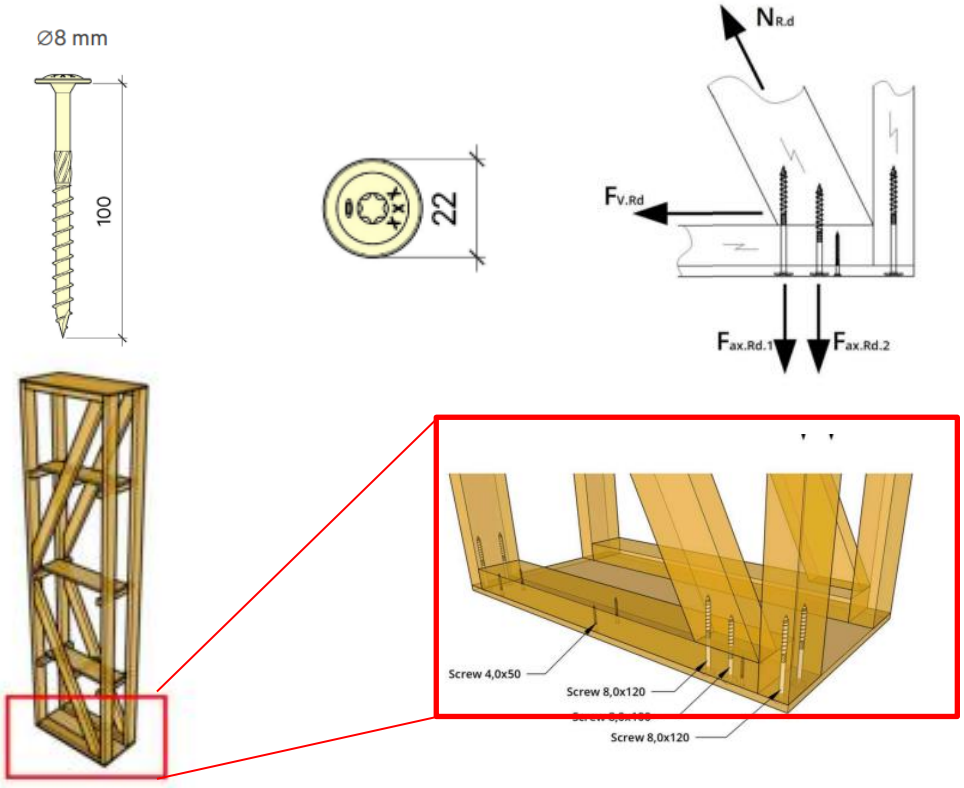


Ilustración 13. Método de conexión con tornillos para unir dos paneles

Fuente: tomado de (EcoCocon s.r.o, 2008)

3. Metodología

Fuente de imagen: https://ecococon.eu/es/the-panel-system

El diseño metodológico de este estudio se desarrolló bajo la literatura de (Hernández Sampieri Roberto et al., 2014), en el cual se determinó que el enfoque que más se ajusta a esta investigación es el cuantitativo, ya que este enfoque requiere de metas para su investigación como describir, explicar, comprobar y predecir los fenómenos (causalidad). Que, en conclusión, genera y prueba teorías con la recolección de datos.

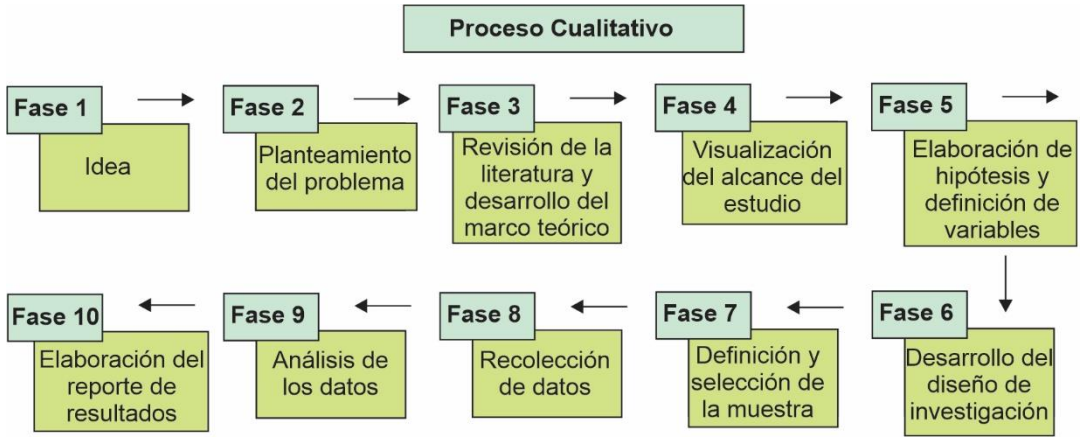


Ilustración 14. Proceso Cualitativo

Fuente: Elaboración propia con información de (Hernández Sampieri Roberto et al., 2014)

Nota: debido a que esta investigación no es una tesis, si no un proyecto final de maestría no fue necesario plantear la fase 5: elaboración de hipótesis.

El enfoque cuantitativo fue de diseño experimental, esto se refiere al estudio que manipula intencionalmente una o más variables independientes sobre otras variables dependientes, Es decir, los diseños experimentales se utilizan cuando se pretende un nuevo efecto en una variable que ya está establecida.

Este estudio cualitativo experimental será de tipología experimentos de laboratorio dado que se realizan en condiciones controladas, considerando que los resultados surgirán a partir de un modelo de cálculo creado durante la realización del trabajo y no en situaciones de campo.

Como se ha mencionado anteriormente, este trabajo de grado se centra en optimizar el modelo existente de panel prefabricado con estructura de madera natural y relleno de paja para convertirlo en un sistema innovador de paneles ecológicos prefabricados. Este nuevo sistema incorpora materiales compuestos a partir de madera plástica.

Por lo tanto, las variables de experimentación de esta investigación serán:

-Variable independiente (Grupo de control): comportamientos mecánicos de madera plástica

-Variable dependiente (Grupo experimental): comportamiento mecánico de la madera plástica al reforzarla con fibra de madera y vidrio para implementarla en la construcción.

En la siguiente ilustración se mostrará las etapas para el desarrollo de esta investigación

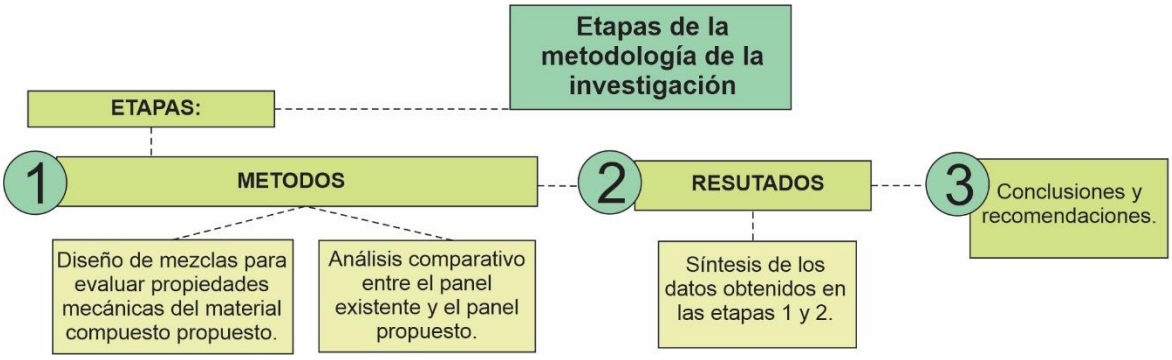


Ilustración 15. Etapas de la metodología de la investigación

Fuente: Elaboración propia

3.1 Descripción de las etapas del estudio:

3.1.1 Etapa 1: Métodos

3.1.1.1 Diseño de mezclas

El diseño de mezclas se refiere al proceso de escoger los materiales y sus proporciones adecuadas con el fin de producir un material compuesto que cumpla con los requerimientos de propiedades física y mecánicas, de durabilidad y de peso que se necesita para su implementación.

Con los datos técnicos obtenidos en el diseño de mezclas, se realizaron los cálculos con el propósito de conocer cuanto volumen de cada material que se propuso, se requiere para optimizar las propiedades mecánicas del material compuesto.

Esta herramienta de regla de mezclas fue elaborada y diseñada en el programa Microsoft Excel **(Anexo 1)**, de tal forma que, al introducir los datos en las casillas, estas estuvieran completamente formuladas, así automáticamente al cambiar cualquier número de cualquier casilla cambiaría el resultado, esta regla de mezclas se realizó con la finalidad de poder cambiar múltiples veces lo volúmenes o propiedad de los materiales de manera repetitiva hasta alcanzar los resultados deseados. Esta herramienta se diseña con el propósito de definir las características mecánicas y físicas que tendrá el panel propuesto, por lo que requiere de los siguientes pasos:

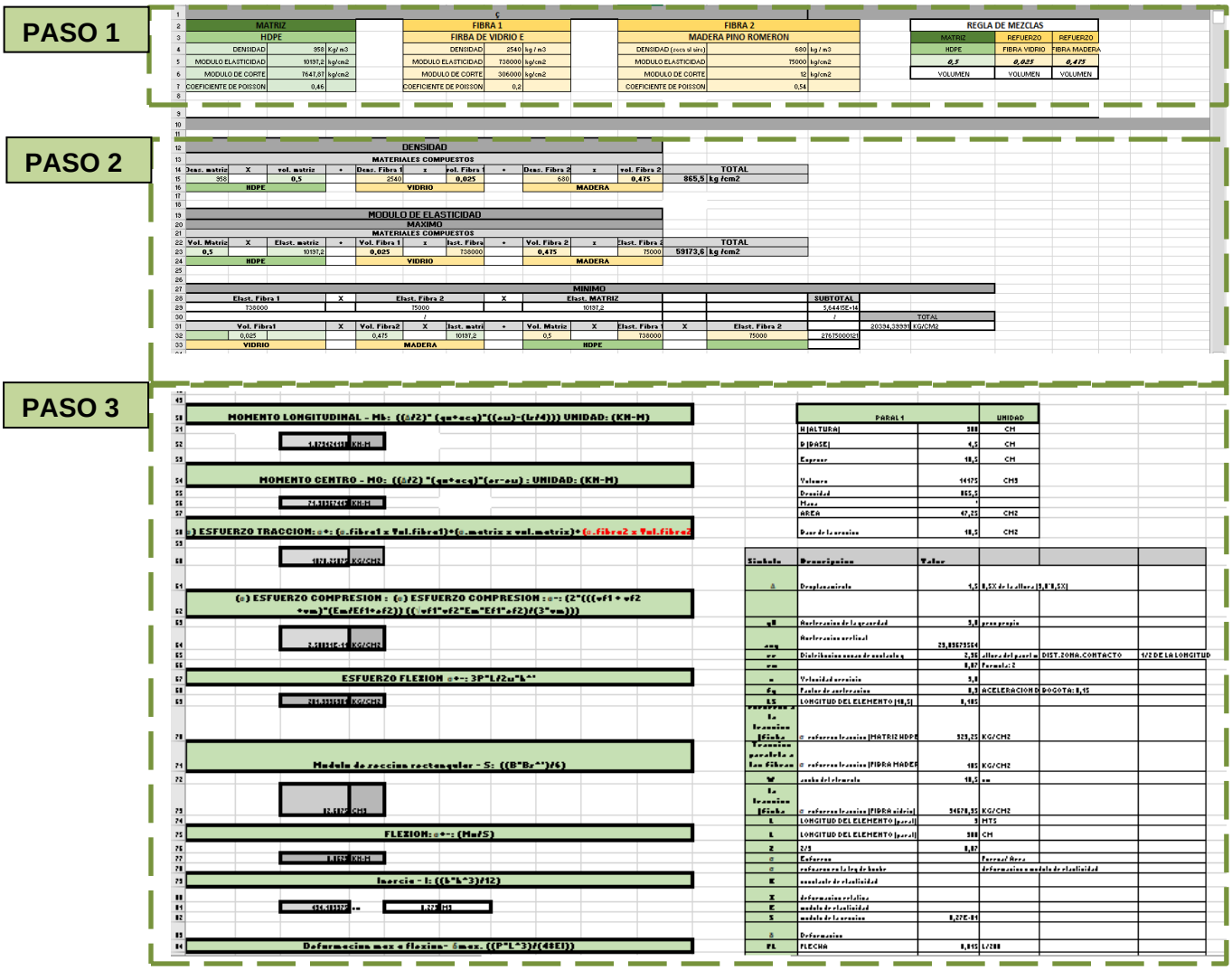
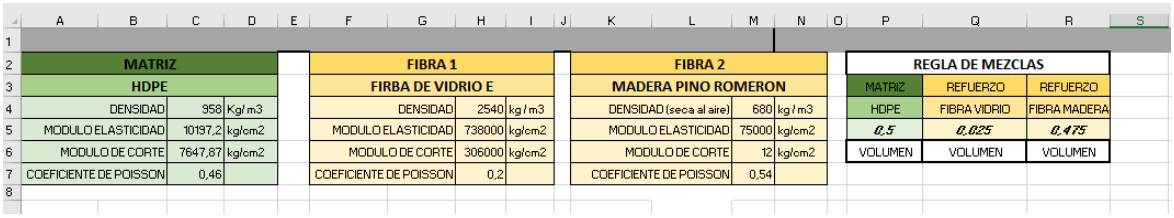


Ilustración 16. Formato y desarrollo regla de mezclas en Microsoft Excel.

Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Se realizaron búsquedas en la literatura científica para obtener información sobre las cuatro propiedades mecánicas: (densidad, módulo de elasticidad, módulo de corte y coeficiente de Poisson) de los materiales que se utilizarán en el estudio: (polietileno de alta densidad, fibra de madera y fibra de vidrio). Además, se creó una tabla independiente para registrar los diferentes volúmenes que tendrá el material compuesto, como se observa en la Ilustración 16, con el fin de iniciar el diseño de mezclas.



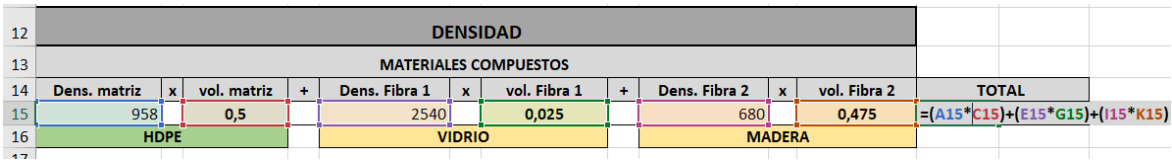
MATRIZ			FIBRA 1			FIBRA 2		
HDPE			FIRBA DE VIDRIO E			MADERA PINO ROMERON		
DENSIDAD	958	Kg/m3	DENSIDAD	2540	kg/m3	DENSIDAD (seca al aire)	680	kg/m3
MODULO ELASTICIDAD	10197,2	kg/cm2	MODULO ELASTICIDAD	738000	kg/cm2	MODULO ELASTICIDAD	75000	kg/cm2
MODULO DE CORTE	7647,87	kg/cm2	MODULO DE CORTE	306000	kg/cm2	MODULO DE CORTE	12	kg/cm2
COEFICIENTE DE POISSON	0,46		COEFICIENTE DE POISSON	0,2		COEFICIENTE DE POISSON	0,54	

REGLA DE MEZCLAS		
MATRIZ	REFUERZO	REFUERZO
HDPE	FIBRA VIDRIO	FIBRA MADERA
0,5	0,025	0,475
VOLUMEN	VOLUMEN	VOLUMEN

Ilustración 17. Propiedades y volumen de los materiales a utilizar.

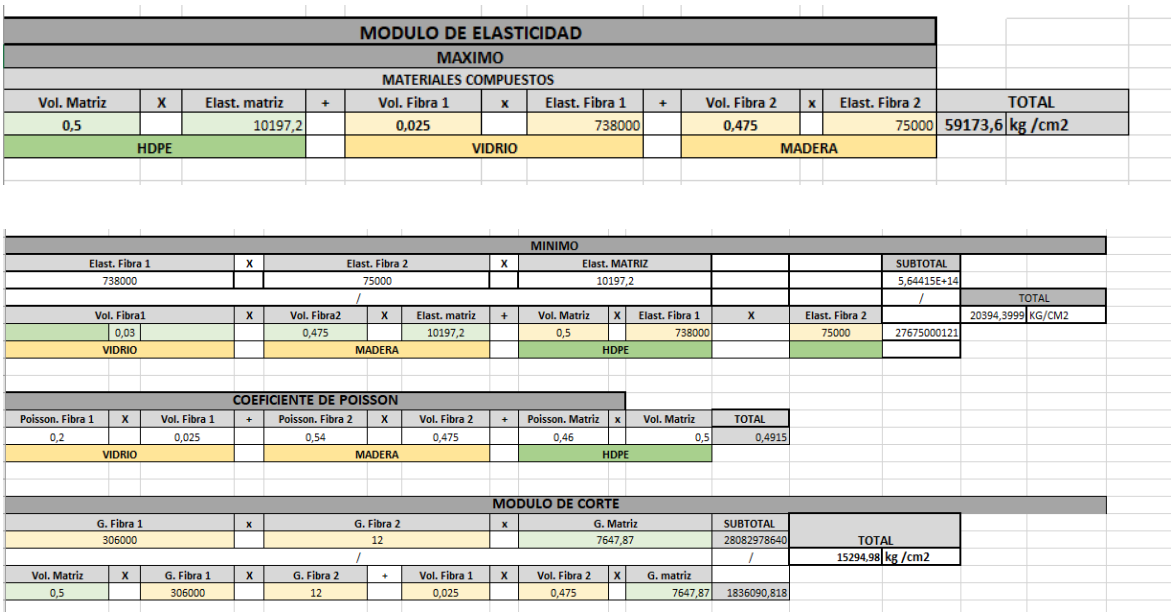
Fuente: Elaboración propia

Paso 2: Utilizando los datos obtenidos en el paso 1, se inicia el desarrollo de cálculos para determinar las propiedades mecánicas del material compuesto, es decir, las propiedades resultantes de la combinación de estos tres materiales en uno solo.



DENSIDAD									
MATERIALES COMPUESTOS									
Dens. matriz	x	vol. matriz	+	Dens. Fibra 1	x	vol. Fibra 1	+	Dens. Fibra 2	x	vol. Fibra 2	TOTAL
958		0,5		2540		0,025		680		0,475	=(A15*C15)+(E15*G15)+(I15*K15)
HDPE				VIDRIO				MADERA			

Nota: las casillas están formuladas y enlazadas entre sí.



MODULO DE ELASTICIDAD											
MAXIMO											
MATERIALES COMPUESTOS											
Vol. Matriz	X	Elast. matriz	+	Vol. Fibra 1	x	Elast. Fibra 1	+	Vol. Fibra 2	x	Elast. Fibra 2	TOTAL
0,5		10197,2		0,025		738000		0,475		75000	59173,6 kg /cm2
HDPE				VIDRIO				MADERA			

MINIMO												
Elast. Fibra 1	x	Elast. Fibra 2	x	Elast. MATRIZ			SUBTOTAL					
738000		75000		10197,2			5,64415E+14					
/							/	TOTAL				
Vol. Fibra1	X	Vol. Fibra2	X	Elast. matriz	+	Vol. Matriz	X	Elast. Fibra 1	X	Elast. Fibra 2		20394,3999 KG/CM2
0,03		0,475		10197,2		0,5		738000		75000	27675000121	
VIDRIO		MADERA				HDPE						

COEFICIENTE DE POISSON										
Poisson. Fibra 1	X	Vol. Fibra 1	+	Poisson. Fibra 2	X	Vol. Fibra 2	+	Poisson. Matriz	x	Vol. Matriz	TOTAL
0,2		0,025		0,54		0,475		0,46		0,5	0,4915
VIDRIO				MADERA				HDPE			

MODULO DE CORTE										
G. Fibra 1	x	G. Fibra 2	x	G. Matriz			SUBTOTAL			
306000		12		7647,87			28082978640	TOTAL		
/							/	15294,98	kg /cm2	
Vol. Matriz	X	G. Fibra 1	X	G. Fibra 2	+	Vol. Fibra 1	X	Vol. Fibra 2	X	G. matriz	
0,5		306000		12		0,025		0,475		7647,87	1836090,818

Ilustración 18. propiedades mecánicas del material compuesto.

Fuente: Elaboración propia

Paso 3: En este último paso, se desarrollaron los cálculos mediante una serie de fórmulas conocidas como leyes o modelos de comportamiento mecánico utilizadas para encontrar las propiedades mecánicas del panel propuesto, las cuales definen si cumple o no con las especificaciones técnicas del material para ser implementado en el sector de la construcción. Las fórmulas o modelos de comportamiento mecánico utilizados para este trabajo de grado fueron: densidad, módulo de elasticidad, coeficiente de poisson, módulo de corte, momento longitudinal, momento centro, radio de giro, aceleración vertical, esfuerzo a tracción, esfuerzo a flexión, flexión del elemento, inercia, deformación máxima a flexión, longitud de pandeo, esbeltez, torsión y ley de Hooke – deformaciones.

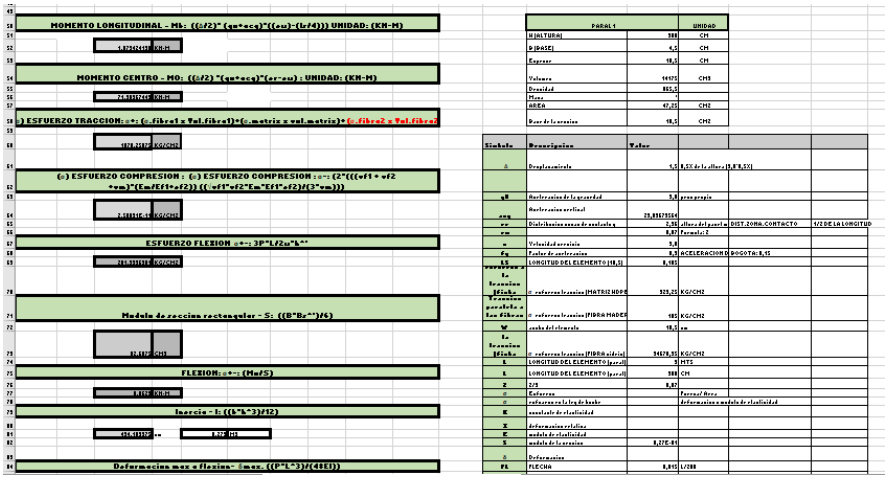


Ilustración 19. cálculos propiedades mecánicas del panel propuesto.

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.2 Análisis comparativo y búsqueda de variables entre la empresa EcoCocon y la propuesta en esta investigación

A partir del análisis y los resultados obtenidos en la regla de mezclas, se llevará a cabo una comparación detallada entre el panel utilizado por la empresa EcoCocon y el panel propuesto en esta investigación. El objetivo es dar a conocer las distintas características y propiedades de ambos paneles, lo que permitirá comprender mejor sus diferencias y similitudes.

3.1.2 Etapa 2: Resultados

Durante esta etapa, se definirá el alcance de la investigación mediante el procesamiento y análisis estructurado de la información y los datos recopilados en las etapas 1 y 2. Con el propósito de obtener los resultados del estudio y determinar si la investigación logra cumplir con los objetivos establecidos.

3.1.3 Etapa 3: Conclusiones y recomendaciones

Después de considerar y analizar los datos obtenidos a lo largo de esta investigación, en esta etapa se sintetizarán brevemente los puntos más relevantes, dando respuesta a los objetivos de este trabajo, adicionalmente se expondrán recomendaciones para estudios posteriores que deseen abordar nuevamente este tema y quieran complementar la información descrita.

4. Discusión de resultados

Fuente: tomado de https://ecococon.eu/es/blog/2020/building-with-ecococon-panels

4.1 Métodos

Como se mencionó y explicó en la metodología. Este capítulo comprende el diseño de mezclas y el análisis comparativo entre el panel existente de madera y paja y el panel propuesto en esta investigación.

Diseño de la estructura del panel propuesto

Para el diseño de la estructura del panel propuesto en esta investigación se optó por manejar y mantener casi todas las medidas del panel de madera y paja, para llegar a una relación y a una comparación más precisa de las propiedades mecánicas al utilizar madera plástica como sustituto de la madera natural del panel.

Se utilizaron las mismas medidas de ancho, largo y alto del panel de EcoCocon (800mm x 400mm x 3000mm). La única que medida que se modifico fue el largo de los parales con el fin de mejorar la relación de esbeltez del elemento, como se explicará más adelante.

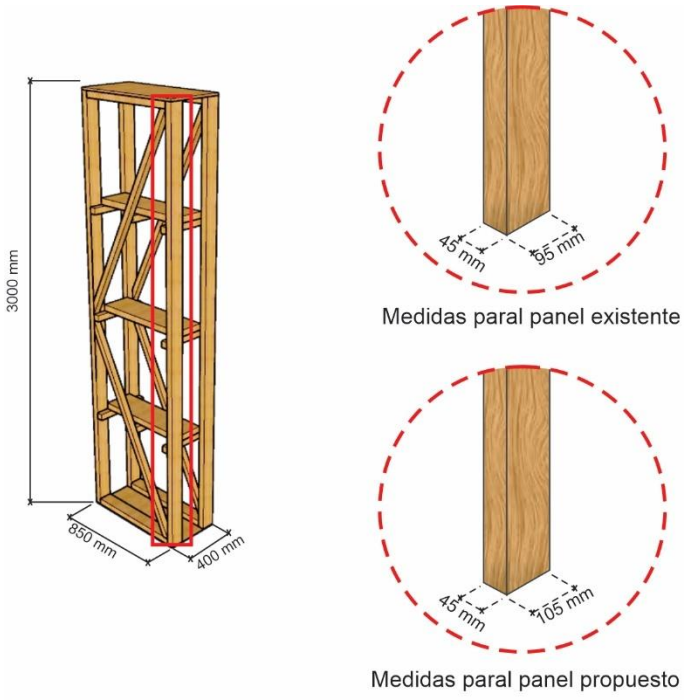


Ilustración 20. Medidas del panel propuesto

Fuente: Elaboración propia

DESCRIPCIÓN	PANEL ECOCOCON (0,80*3,0) =2,40 M^2	PANEL MADERA PLASTICA (0,80*3,0) =2,40 M^2
Tipo de material	Madera natural C24	Madera plástica (HDPE+FVR+FM)
Ancho del paral	45mm	45mm
Largo del paral	95mm	105mm
Alto del paral	3000mm	3000mm

Tabla 20. Comparación de medidas del panel de la empresa EcoCocon y del panel propuesto

Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Diseño de mezclas

Paso 1: El material propuesto para este estudio teórico es polietileno de alta densidad (HDPE) con fibra de madera de Pino Romerón, la unión de estos dos compuestos se conoce como madera plástica (WPC), esta se reforzará con fibra de vidrio (FV) para aumentar sus propiedades mecánicas.

Con el objetivo de identificar el volumen óptimo de matriz y fibras necesario para lograr las mejores propiedades mecánicas de la madera plástica sin aumentar considerablemente su densidad, se incorporaron y vincularon los datos técnicos de los materiales en el programa Microsoft Excel (ver Anexo 1). Esta implementación permite ajustar porcentajes o datos, lo que provoca automáticamente la modificación de todas las fórmulas, facilitando así la exploración de diversas combinaciones de mezclas de manera interactiva.

Según (Ramos-Tino, 2010), se considera que el porcentaje de material de matriz en un compuesto debe representar al menos la mitad del porcentaje total del compuesto. Basándonos en esta premisa, se decidió que la matriz constituiría el 50% del compuesto. Los porcentajes de los refuerzos se ajustaron hasta alcanzar el valor deseado.

Los volúmenes de matriz y fibras que mostraron las mejores prestaciones mecánicas del material fueron: **Matriz de HDPE 50%, Fibra de madera de Pino Romerón 47.5% y Refuerzo en fibra de vidrio 2.5%.**

VOLUMEN DEL MATERIAL COMPUESTO		
MATRIZ	REFUERZO	REFUERZO
HDPE	FIBRA VIDRIO	FIBRA MADERA
0,5	***0,025***	***0,475***
VOLUMEN	VOLUMEN	VOLUMEN

Tabla 21. Volumen del material compuesto.

Fuente: Elaboración propia

PROPIEDADES DE LA MATRIZ		
HDPE		
DENSIDAD	958	Kg/ m^3
MODULO ELASTICIDAD	10197,2	kg/cm^2
MODULO DE CORTE	7647,87	kg/cm^2
COEFICIENTE DE POISSON	0,46	-

Tabla 22. Propiedades de la matriz.

Fuente: Elaboración propia

PROPIEDADES DE LA FIBRA 1		
MADERA PINO ROMERÓN		
DENSIDAD (seca al aire)	680	kg /m^3
MODULO ELASTICIDAD	75000	kg/cm^2
MODULO DE CORTE	12	kg/cm^2
COEFICIENTE DE POISSON	0,54	-

Tabla 23. Propiedades de la fibra 1.

Fuente: Elaboración propia

PROPIEDADES DE LA FIBRA 2		
FIRBA DE VIDRIO E		
DENSIDAD	2540	kg / m^3
MODULO ELASTICIDAD	738000	kg/cm^2
MODULO DE CORTE	306000	kg/cm^2
COEFICIENTE DE POISSON	0,2	-

Tabla 24. Propiedades de la fibra 2.

Fuente: Elaboración propia

Pasos 2 y 3: Posteriormente de recopilar los datos sobre las propiedades de cada uno de los materiales y definir los volúmenes que tendrán la matriz y el refuerzo, se procedió al desarrollo de fórmulas y cálculos para obtener las propiedades mecánicas del material compuesto. Las propiedades mecánicas son aquellas que están vinculadas a las fuerzas externas que actúan sobre el material. Presentándose detalladamente en las siguientes fichas:

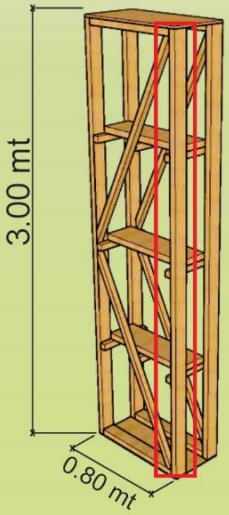
NOMENCLATURA Y DATOS TECNICOS

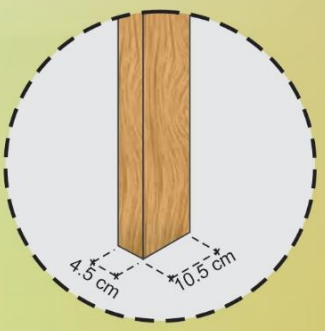
Densidad	ρ
Volumen	V
Mod. elasticidad	E
Coef. de Poisson	ע
Mod. de corte	G
Esbeltez	λ
Long. pandeo	Lk
Beta	β
Esfuerzo compresión	σ
Momento longitudinal	Mb

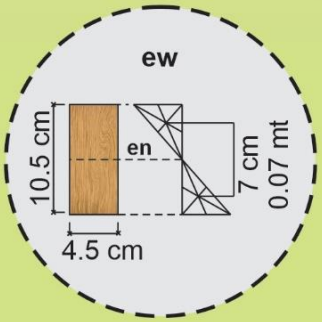
Desplazamiento	Δ
Acel. gravedad	g0
Acel. vertical	acq
Centro de gravedad	er
Altura efectiva	ew - Z
Velocidad de servicio	v
Factor de aceleración	fq
Long. base elemento	Ls
Espesor elemento	W - Bs -Ls
Módulo sección	S

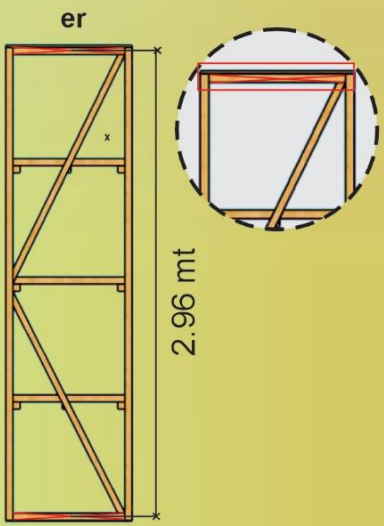
Inercia	I
Radio de giro	i
Brazo palanca	R
Carga	P
Diámetro de la fibra	d
Momento centro	M0
Longitud del elemento	L
Base del elemento	B
Torcion	TC
Deformación - Hooke	δ

L = Longitud del paral	3,0 mts
Ancho de panel arriostrado	0,80 mts
B ó h=Ancho base del elemento	4,5 cm
Ls, Bs, ó W = Longitud base del elemento	10,5 cm
Δ = (0.5% * h) Δ = (0.5% * 3.00)	0,015
g0 = Valor global tierra	9,8
fq = Aceleración suelo en Colombia	0,3
ew - Z = Altura efectiva	0,07 cm
er = Distribución zonas de contacto	2,96 mts
σ+ = Esfuerzo a tracción matriz HDPE	323,25 kg/cm2
σ+ = Esfuerzo a tracción fibra vidrio	34670,25 kg/cm2
σ+ = Esfuerzo a tracción fibra madera	105 kg/cm2



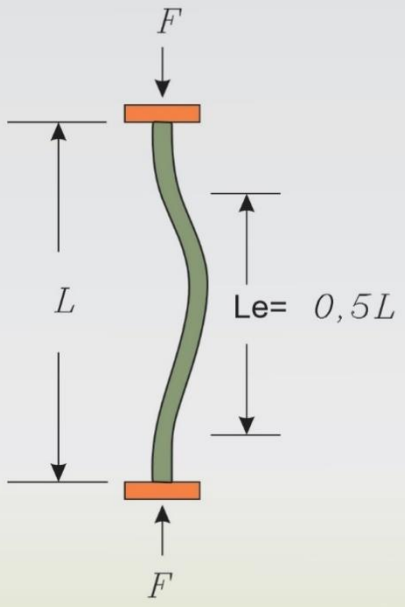






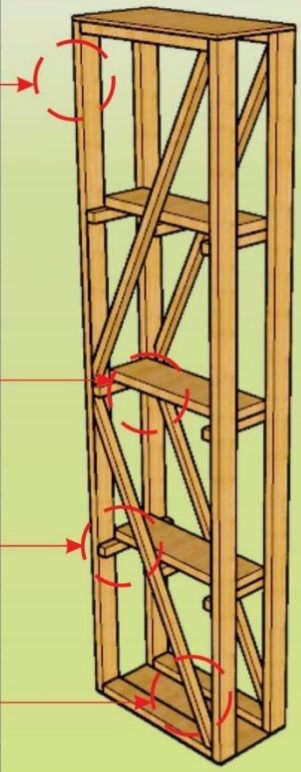
NOMENCLATURA Y DATOS TECNICOS

β = Empotrado - empotrado



P = Peso propio del panel	133,24 kg
β = Apoyo empotrado - empotrado	0,5
A= Área del panel 10,5 x 4,5	47,25 cm2
d= Diámetro de la fibra	0,0055 cm
Tc = Resistencia al corte por matriz	7647,87 kg/cm2

PESO TOTAL DE MODULO MADERA PLASTICA					
PESO DE PARALES LONGITUDINALES					
LS del elemento	Ancho del elemento	Longitud del elemento	Densidad del material compuesto	Unidad de parales	Total
0,105	0,045	3,00	865,5	4 und	49,073 kg
PESO LAMINAS TRANSVERSALES					
0,40	0,80	0,05	865,5	3 Und	41,544 kg
PESO SOPORTES DE LAMINAS TRANSVERSALES					
0,095	0,09	0,40	865,5	6 Und	17,760 kg
PESO DIAGONAL PANEL					
0,105	0,045	1,52	865,5	4	24,86 kg
				TOTAL	133,24 kg



Diseño Panel Rectangular

MATRIZ		
HDPE		
Densidad	958	Kg/cm³
Mod. Elasticidad	10197,2	Kg/cm²
Mod. de Corte	7647,87	Kg/cm²
Coef. Poisson	0,46	-

FIBRA 1		
FIBRA DE VIDRIO TIPO E		
Densidad	2540	Kg/cm³
Mod. Elasticidad	738000	Kg/cm²
Mod. de Corte	306000	Kg/cm²
Coef. Poisson	0,2	-

FIBRA 2		
MADERA PINO ROMERON		
Densidad	680	Kg/cm3
Mod. Elasticidad	75000	Kg/cm²
Mod. de Corte	12	Kg/cm²
Coef. Poisson	0,54	-

REGLA DE MEZCLAS		
MATRIZ	REFUERZO	REFUERZO
HDPE	FIBRA DE VIDRIO	FIBRA DE MADERA
0,5	0,025	0,475

Densidad del material compuesto

Formula: ρ= (ρ.matriz * V.matriz)+(ρ.fibra1 * V.fibra2)+(ρ.fibra2 * V.fibra2)

ρ= (958 * 0,5)+(2540 * 0,025)+(680 * 0,475) = 865,5 kg/cm3

Modulo de elasticidad del material compuesto (MAX)

Formula: E= (V.matriz * E.matriz)+(V.fibra1 * E.fibra1)+(V.fibra2 * Ef.ibra2)

E= (0,5 * 10197,2) + (0,025 * 738000) + (0,475 * 75000) = 59174 kg/cm2

Modulo de elasticidad del material compuesto (MIN)

Formula: E= (E.fibra1 * E.fibra2 * E.matriz) / (V.fibra1 * V.fibra2 * E.matriz) + (V.matriz * E.fibra1 * E. fibra 2)

E= (738000 * 75000 * 10197,2) / (0,025 * 0,475* 10197,2) + (0,5 * 738000 * 75000) = 20394,39991kg/cm2

Coeficiente de poisson del material compuesto

Formula: ɣ= (ɣ.fibra1 * V.fibra1) + (ɣ.fibra2 * V.fibra2) + (ɣ.matriz * V.matriz)

ɣ= (0,2 * 0,025) + (0,54 * 0,475) + (0,46 * 0,5) = 0,4915

Modulo de corte del materiales compuesto

Formula: G= (G.fibra1 * G.fibra2 * G.matriz) / (V.matriz * G.fibra1 * G.fibra2) + (V.fibra1 * V.fibra2 * G.matriz)

G= (306000 * 12 * 7647,87) / (0,5 * 306000 * 12) + (0,025 * 0,475 * 7647,87) = 15294,98kg/cm2

Diseño Panel Rectangular

Área de sección transversal parales

Formula: A = b*h A= 4,5 * 10,5 = 47,25 cm²

Segundo momento de área (I_x), (I_y)

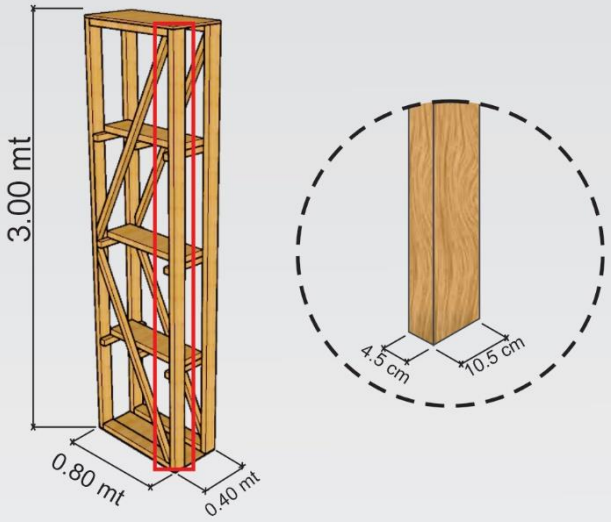
Formula: I_x= h³*b/12 I_x= 10,5³*4,5/12 = 434,109 cm⁴
I_y= h*b³/12 I_y= 10,5*4,5³/12 = 79,734 cm⁴

Radio de giro (i)

Formula: i= √I/A i= √434,109375 / 47,25 = 3,03cm

Longitud del elemento (l_{ef*x}), (l_{ef*y})

Formula: **$l_{ef.x}$ = μ_x x I_x** $l_{ef.x}$ = 1,0 * 2,886= 2,886mt
$l_{ef.y}$ = μ_y x I_y $l_{ef.y}$ = 1,0 * 0,628= 0,628 mt



Aceleración vertical (acq)

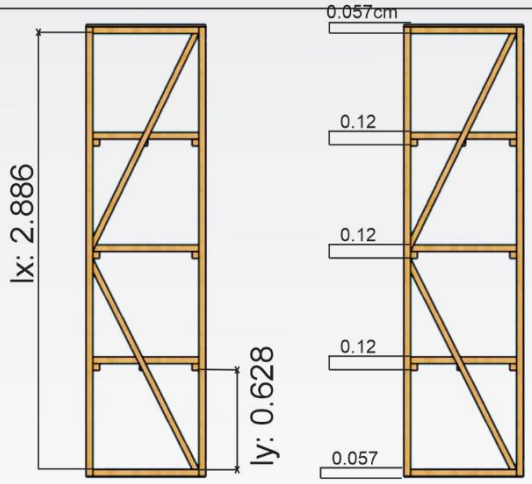
Formula: acq =((v/√L)*(3.2/L^0,76)*Fg*g0) acq = ((9,8/√3,0mts)*(3.2/3,0mts^0,76)*0,3*9,8)
acq= 23,096 mt/sg2

Momento Longitudinal (Mb)

Formula: Mb= ((Δ/2)* (g0+acq)*((ew)-(ls/4)))
Mb= ((1.5/2)* (9,8+23,096)*((0,07mt)-(0,105mt/4)))
Mb= 1,079 KN/M

Momento Centro (M0)

Formula: M0= ((Δ/2) *(g0+acq)*(er-ew)
M0= ((1,5/2) *(9,8 + 23,096)*(2,96mt - 0,07mt)
M0= 71,30 KN/M



Esfuerzo a tracción (σ+)

Formula: σ+= (σ.fibra1 * Vol.fibra1) + (σ.matriz * vol.matriz) + (σ.fibra2 * Vol.fibra2)
σ+= (34670,35 * 0,025)+(323,25 * 0,5)+(105 * 0,475) = 1078 kg/cm2

Esfuerzo a flexión (σ+-)

Formula: σ+-= (3*P*L)/(2*w*h^²) σ+-= (3*133,24kg*300cm)/(2*10,5cm*4,5cm^²)= 282 kg/cm2

Diseño Panel Rectangular

Modulo sección rectangular (S)

Formula: S= ((B*Bs^²)/6) S= ((4,5cm*10,5cm^²)/6)= 82,6875cm3

Flexión del elemento

Formula: σ+- = (Mo/S) σ+- = (71,30KN/M / 82,6875cm3)= 0,8623 KN/M

Inercia (I)

Formula: I= ((B*h^3)/12) I= ((4,5cm*10,5cm^3)/12)= 434,1094cm

Deformación máxima a flexión (δmax)

Formula: δmax= ((P*L^3)/(48*E*I) δmax=((133,24kg*300cm^3)/(48*59174kg/cm2*434,1094cm)) = 2,91cm

Longitud de pandeo (Lk)

Formula: Lk:(β*L) Lk:(0,5 *300 cm) = 150cm

Esbeltez (λ)

Formula: λ= (Lk/i) λ= (150cm/ 3,03cm) = 49,49cm

Torsión (TC)

Formula: TC= (Mo/S) TC= (71,30 KN/M / 82,6875cm) = 0,862KN/M2

Hooke - Deformaciones (δ)

Formula: δ= ((P*L)/(E*A)) δ= ((133,24kg*300cm)/(59174 kg/cm2*47,25cm2)) = 0,014 kg/cm2

4.2.2.1 Cuadro comparativo entre el marco existente y el panel propuesto en esta investigación

A partir de los datos obtenidos en el capítulo anterior se realizó una comparación detallada entre el panel existente y el panel propuesto en esta investigación, con el objeto de dar a conocer las distintas características y propiedades de ambos paneles para comprender mejor sus diferencias y similitudes.

PROPIEDADES	MARCO PANEL EXISTENTE	MARCO PROPUESTO EN MADERA PLASTICA
Tipo de madera	C24: Puede soportar cargas elevadas: Flexión 24N/mm^2	Madera plástica: Fibra de madera + Fibra de vidrio
Ancho del paral	45 mm	45 mm
Largo del paral	95 mm	105 mm
Longitud de pandeo (eje x)	2,886 m	1,5 m
Resistencia a la flexión de la madera	24 MPa	27,65 MPa
Módulo de elasticidad de la madera paralelo a la fibra	7400 MPa	5802 MPa
Radio de giro (min)	12,99mm	30,3 mm
Relación de esbeltez (min)	48,343	49,49

Tabla 25. Cuadro comparativo entre el panel EcoCocon y el panel propuesto.

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las propiedades anteriormente descritas del panel de EcoCocon se tomaron del *brochure EcoCocon Sample Structural Calculation*, el cual se puede encontrar en el siguiente enlace (https://ecococon.eu/es/profesionales/descargas) o en el Anexo 2 de este documento.

4.2 Resultados y discusión

4.2.1 Resultados del análisis del material compuesto

Se eligió el polietileno de alta densidad (HDPE) como matriz del material compuesto para este estudio en lugar de otros plásticos, debido a que es uno de los plásticos desechados más comunes en nuestro entorno, además mantiene sus propiedades al reciclarlo lo que lo hace ideal para su uso e implementación en la construcción. Tiene una estructura hidrofóbica que evita la entrada de humedad al interior otorgándole alta resistencia a ataques de agentes químicos lo que lo hace adecuado para la intemperie, Adicionalmente es un material muy tenaz pudiendo resistir grandes impactos, absorbiendo la energía presentada mediante la deformación.

Se seleccionaron como fibras de refuerzo la madera de pino romerón y la fibra de vidrio. La elección de la madera de pino romerón se debe a su valor para la reforestación, ya que el cultivo de estos árboles contribuye a la conservación de la cobertura vegetal. Una vez que alcanzan su madurez, pueden ser utilizados como material maderable sin causar daños al medio ambiente. Por otro lado, la fibra de vidrio se introdujo para aumentar la rigidez y mejorar las propiedades mecánicas del HDPE. Este material es de bajo costo, accesible y no representa una amenaza para el medio ambiente.

Durante el estudio del material, se observó que la madera plástica, al tener dos componentes -uno hidrofóbico en la matriz (HDPE) y otro hidrofílico en el refuerzo (madera de pino romerón)- requiere de un agente de acoplamiento como el Anhídrido Maleico para lograr una conexión óptima entre la matriz y el refuerzo. La madera plástica puede ser utilizada de manera similar a la madera natural, ya que puede ser cortada, clavada y moldeada.

4.2.2 Resultado del diseño de mezclas

El diseño de mezclas revela los valores de las propiedades mecánicas que tendrá el panel de madera plástica con fibra de vidrio desarrollado en esta investigación. Es importante destacar que los resultados obtenidos corresponden a formulaciones teóricas y no se respaldan con pruebas o ensayos físicos de esfuerzo.

La siguiente tabla muestra los datos más significativos obtenidos mediante la regla de mezclas.

PROPIEDADES DEL PANEL		
WPC + FV		
DENSIDAD	865,5	Kg/ m^3
MODULO ELASTICIDAD	59174	kg/cm^2
COEFICIENTE DE POISSON	0,49	-
RESISTENCIA A LA FLEXION	27,65	MPa
MODULO DE ELASTICIDAD	5802	MPa
ESFUERZO A TRACCION	105.71	MPa

Tabla 26. Propiedades mecánicas del panel en madera plástica.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los resultados, se observa una diferencia con respecto a la madera natural promedio presentada en la tabla 9, que tiene una densidad de 680 g/cm^3. La WPC + FV resulta ser un 21% más pesada. En cuanto a la resistencia a la tracción, la madera natural alcanza los 10.29 MPa, mientras que la WPC los 105.71 MPa, lo que representa un aumento del 90% en la resistencia. En cuanto al módulo de elasticidad, la madera natural cuenta con 75,000 kg/cm^2, mientras que la WPC cuenta con 59,174 kg/cm^2, lo que indica que la WPC es un 21% menos elástica que la madera natural. Estos valores demuestran la optimización y mejora de la WPC + FV en comparación con la madera natural.

4.2.3 Resultados del cuadro comparativo

Resultados de las propiedades mecánicas de los paneles
1. Resistencia a la Flexión
• La resistencia a la flexión del panel EcoCocon promedio fue de [24] MPa. • La resistencia a la flexión por el panel propuesto fue de [27,65] MPa
El panel de WPC es 13% más resistente a la flexión que el panel de EcoCocon
2.Módulo de Elasticidad
• El módulo de elasticidad del panel EcoCocon promedio fue de [7400] MPa. • El módulo de elasticidad del panel propuesto fue de [5802] MPa
El panel de WPC es 22% menos elástico que el panel EcoCocon
3.Radio de Giro
• El radio de giro del panel EcoCocon promedio fue de [12,99] mm. • El radio de giro del panel propuesto fue de [30,3] mm
El panel de WPC tiene 14% más de radio de giro que el panel de EcoCocon
4.Relación de esbeltez
• La relación de esbeltez del panel EcoCocon promedio fue de [48,343] • La relación de esbeltez del panel propuesto fue de [49,49]
El panel de WPC tiene 2% más de relación de esbeltez que el panel de EcoCocon
5.Longitud de pandeo
• La longitud de pandeo del panel EcoCocon promedio fue de [2,886] m • La longitud de pandeo del panel propuesto fue de [1,5] m
El panel de WPC tiene 4% menos longitud de pandeo que el panel de EcoCocon

Tabla 27. Resultados del estudio

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados evidencian que el panel de madera plástica se comporta de manera muy similar al panel de madera natural. Las variaciones observadas no son significativamente drásticas, lo que sugiere que sustituir la estructura de madera natural del panel EcoCocon por una estructura de madera plástica reforzada con fibra de vidrio es una alternativa viable. Este hallazgo respalda la viabilidad de utilizar el panel de madera plástica como una opción efectiva y sostenible en comparación con la madera natural.

5. Conclusiones y recomendaciones

Fuente: https://ecococon.eu/es/blog/2020/building-with-ecococon-panels

5.1 Conclusiones

Este estudio se enfocó en la mejora y optimización del panel de madera natural y paja, con el propósito de presentar una alternativa novedosa, sostenible y eficiente. Para alcanzar este objetivo, se realizó una revisión exhaustiva de la literatura relevante y se llevaron a cabo cálculos y fórmulas, los cuales condujeron a las siguientes conclusiones:

Este panel propuesto se erige como una alternativa eficaz y eficiente para combatir la contaminación ambiental en el país. Al estar compuesto íntegramente por materiales reciclables, no solo contribuye a reducir la elevada demanda de explotación de materias primas, sino que también aborda la problemática de la disposición final de los residuos plásticos. Además, presenta propiedades mecánicas idóneas para su implementación en la construcción, cumpliendo de manera integral el objetivo principal de esta investigación.

La madera plástica exhibe propiedades físicas superiores en comparación con la madera natural, gracias a su estructura hidrofóbica que impide la absorción de humedad, otorgándole una resistencia destacada contra agentes químicos. convirtiéndola en una opción idónea para la exposición a la intemperie, asegurando una durabilidad significativa, Además, requiere menos mantenimiento que la madera natural, ya que no se pudre, no se agrieta y no necesita ser tratada con productos químicos protectores.

Los resultados obtenidos en la fase experimental (regla de mezclas) se consideran teóricamente viables, ya que los datos reflejan un comportamiento mecánico similar al observado en el panel de la empresa EcoCocon. No obstante, es importante señalar que, para incrementar la confiabilidad de la experimentación, se requiere una planificación más detallada en relación con las variables que conforman el diseño experimental, incluyendo ensayos de laboratorios adicionales. Esto permitiría alcanzar conclusiones con un nivel de confianza más elevado. A pesar de ello, los resultados teóricos de las resistencias mecánicas son positivos, como para considerar que no hay impedimentos significativos para su implementación en el sector de la construcción.

5.2 Recomendaciones.

Se sugiere realizar una comparación mediante el análisis de ciclo de vida de los materiales propuestos en la investigación con respecto a la madera natural. Este enfoque permitirá identificar impactos ambientales, evaluar la eficiencia de los recursos utilizados y considerar alternativas que reduzcan al mínimo el impacto negativo en el medio ambiente.

Se recomienda llevar a cabo un análisis de costos que abarque desde el reciclaje del material hasta la fabricación del sistema, como componente integral del estudio de viabilidad. Esto permitirá una planificación minuciosa y eficaz del sistema, evaluando su factibilidad para la construcción.

Se sugiere llevar a cabo estudios de diseño del panel con dimensiones adicionales con el fin de determinar si hay variaciones en sus propiedades mecánicas. Este análisis se centró exclusivamente en un tipo de panel con dimensiones de 0.80 x 0.40 x 300 metros, y explorar otras medidas contribuirá a una comprensión más completa de su desempeño.

Se alienta a explorar nuevas posibilidades de materiales compuestos y a comparar sus propiedades con las propuestas en esta investigación. Este enfoque contribuirá a ampliar la diversidad de opciones de materiales alternativos disponibles en el ámbito de la construcción.

Se recomienda incluir la densidad del aire en la regla de mezclas para futuras investigaciones, ya que puede influir en el peso final del material compuesto. Esto es crucial para calcular con precisión las propiedades mecánicas, como la rigidez, la resistencia y el módulo de elasticidad.

Se sugiere llevar a cabo ensayos de laboratorio del polietileno de alta densidad, la madera de pino romerón y la fibra de vidrio antes de combinarlos en la regla de mezclas. Esto garantizará la obtención de datos más precisos y verificados sobre las propiedades mecánicas siendo fundamental para la formación del material compuesto.

A. Anexo: Brochure *EcoCocon sample structural calculation*

Bibliografía

Adhikary, K. B., Pang, S., & Staiger, M. P. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering*, *39*(5), 807–815. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.005

Aguilera Pizano, A. M., Cruz Aguilar, M., Hernández Bustos, D. A., Ojeda Paredes, A. P., Ramírez Rangel, J. F., Villalpando Vargas, O., Zapien Gómez, J., & Vázquez Núñez, É. (2021). Contribución del sector ladrillero a la contaminación atmosférica empleando el modelo gaussiano y su impacto a la salud de la población: caso de estudio de las ladrilleras del Refugio en la ciudad de León, Guanajuato. *XXVI Verano de La Ciencia UG*, *10*, 1–8.

Alvarado T. María Paula, Álvarez H. Laura Vanessa, Pinzón G. José Luis, & Becerra B. Javier Eduardo. (2021). Fibra de vidrio y sus diferentes aplicaciones en el sector de la ingeniería civil. *L'esprit Ingénieux, 10(1)*, 86–110. http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/2123

Arellano, Diana., & Mejía, U. (2014). EVOLUCIÓN EN LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS DE LA INGENIERÍA CIVIL. *Universidad de Los Andes,* 75–90.

Arevalo Fuentes, R., & londoño, A. (2005). *Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima*. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2935.5049

Betancourt, D., Díaz, Y., & Martirena, F. (2013). Influencia de la adición de un 2% de carbonato de calcio en el proceso de fabricación de los ladrillos de cerámica roja: etapas de secado y cocción. *Revista Ingeniería de Construcción*, *28*, 113–124.

Bhaskar, K., Jayabalakrishnan, D., Vinoth Kumar, M., Sendilvelan, S., & Prabhahar, M. (2021). Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 5886–5891. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.570

Carlevaro, Nadia., Roux-Fouillet, Guillaume., & Schacher, Tom. (2017). Guía para la construcción de viviendas sismo-resistentes en mampostería confinada. *Agencia Suiza Para La Cooperación y El Desarrollo – COSUDE*, 1–148.

Cely, C., & Prieto, L. F. (2014). Materiales compuestos en arquitectura recursos e impacto ambiental. *Revista de Investigación*, *7*, 153–173. https://doi.org/10.29097/2011-639X.174

CEPAL. (n.d.). *Desarrollo Sostenible*. Naciones Unidas - CEPAL. Retrieved October 18, 2023, from https://www.cepal.org/es/temas/desarrollo-sostenible/acerca-desarrollo-sostenible#:~:text=La%20g%C3%A9nesis%20del%20concepto%20de,la%20Asamblea%20General%20en%201983.

Conpes 3919, POLÍTICA NACIONAL DE EDIFICACIONES SOSTENIBLES 1 (2018). https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3919.pdf

Contreras Pérez, A. Felipe., Ochoa Morgan, O. Iván., Ortega Rojas, L. Alfonso., & Gutiérrez de Piñeres Rocha, J. (2020). Elaboración de madera plástica, como material para la construcción de obras civiles. *Documentos de Trabajo Areandina.*, 1–8. https://doi.org/10.33132/26654644.1692

Cueva Márquez, N., Vélez Sánchez, D. F., Barrios Trilleras, A., & Nieto Rodríguez, V. M. (2013). Pino Romeron [Retrophyllum rospigliosii (Pilger) C.n. Page] Especie nativa potencial para la reforestación en zonas altoandinas de Colombia. *Corporación Na-Cional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF®)–Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR)–Cole- Gio Integrado Nacional Oriente de Caldas (CINOC).*, 1–47.

Delgado Murcia, L. G. (2023, April 26). *Del dicho al hecho… sin ciencia no hay desarrollo*. Periódico UNAL / Ciencia y Tecnología. https://periodico.unal.edu.co/articulos/del-dicho-al-hecho-sin-ciencia-no-hay-desarrollo

Dos Santos, F. A., Canto, L. B., Silva, A. L. N., Visconte, L. L. Y., & Pacheco, E. B. A. V. (2018). Processing and Properties of Plastic Lumber. *Thermosoftening Plastics*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139151014

EcoCocon s.r.o. (2008). *EcoCocon*. EcoCocon s.r.o. https://ecococon.eu/es/the-panel-system

García Pérez, L. Andrés. (2021, March 4). *Crisis ambiental en Colombia*. Conversatorio Virtual: Ambiente, Economía y Sociedad. https://www.ucentral.edu.co/noticentral/crisis-ambiental-colombia

García-Velázquez, Á., Amado-Moreno, M., Campbell, H., Brito-Páez, R., & Toscano, L. (2013). Madera plástica con paja de trigo y matriz polimérica. *Revista Tecnología En Marcha*, *26*, 26. https://doi.org/10.18845/tm.v26i3.1515

García-Velázquez, Á., Amado-Moreno, M. G., Campbell-Ramírez, H. E., Brito-Páez, R. A., & Toscano-Palomar, L. (2013). Madera plástica con paja de trigo y matriz

polimérica. *Revista Tecnología En Marcha*, *26*(3), pág. 26-37. https://doi.org/10.18845/tm.v26i3.1515

González Herrera, L. F., Pedraza Vega, J. I., & Gaitán Varón, M. (2021). Portafolio de mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales para el SECTOR ALFARERO Y DE PRODUCCIÓN DE LADRILLO EN COLOMBIA. *Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 1–28. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/PORTAFOLIO-BUENAS-PRACTICAS-SECTOR-LADRILLO.pdf

Grupo de Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Presidencia de la República de Colombia, 2021, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021, Ramírez Rodríguez, C. J., Breukers, L., & Saer Saker, A. J. (2021). PLAN NACIONAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE LOS PLÁSTICOS DE UN SOLO USO. *MESA NACIONAL PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL PLÁSTICO*, 1–31. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/plan-nacional-para-la-gestion-sostenible-de-plasticos-un-solo-uso-minambiente.pdf

Hernández Sampieri Roberto, Fernández Collado Carlos, & Baptista Lucio Pilar. (2014). *Metodología de la investigación* (Marcela I. Rocha Martínez, Ed.; 6th ed.). McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

IDEAM - Instituto de Hidrología, M. y E. A. (n.d.). *CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA*. Retrieved October 15, 2023, from http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire

Iglesias, M., Lesa, A. I., Pérez, C., Mosca, D., & Raimonda, P. (2017). EL PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO: UN MATERIAL VERSÁTIL OLVIDADO EN URUGUAY. *INNOTEC* , *1688–6615*, 56–60. https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEC-Gestion/article/view/438

Labaied, Ines., Douzane, Omar., Lajili, Marzouk., & Promis, Geoffrey. (2022). Bricks Using Clay Mixed with Powder and Ashes from Lignocellulosic Biomass: A Review. *Applied Sciences*, *12*(20), 1–32.

Metropol. (n.d.). *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA*. Retrieved October 19, 2023, from https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/analisis-de-ciclo-de-vida.aspx

Ministerio de Ambiente de Colombia. (n.d.). *La contaminación atmosférica en Colombia*. Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. Retrieved October 15, 2023, from

https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/

Política Gestión Ambiental Urbana, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 1 (2008).

Política Nacional para la Gestión Integral del Recuso Hídrico, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia 1 (2010).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *¿En qué consiste la construcción sostenible?*

Ministerio de Medio Ambiente. (2002). *Aula Abierta, Hábitat Sostenible y Vivienda*. https://guao.org/sites/default/files/biblioteca/Aula%20abierta.%20H%C3%A1bitat%20sostenible%20y%20vivienda.pdf

Pérez, M. (2014). *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. https://doi.org/10.3926/oms.210

Quintero Giraldo, C. (2019, November 18). *Presentación de informe de Greenpeace y Universidad de los Andes: "Casi el 60% de la basura diaria de Bogotá es desecho plástico."* Greenpeace. https://www.greenpeace.org/colombia/noticia/issues/contaminacion/presentacion-de-informe-de-greenpeace-y-universidad-de-los-andes-casi-el-60-de-la-basura-diaria-de-bogota-es-desecho-plastico/

Ramos-Tino, R. (2010). Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio. *Cimbra*, 42–52.

Real Academia Española (RAE), & Asociación de academias de la lengua española. (2022). *Real Academia Española (RAE)*. https://dle.rae.es/mamposter%C3%ADa

Roca Girón, I. E. (2005). *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

Roca Ramon, X. (2005). *ESTUDIO DE LA APLICABILIDAD DE MATERIALES COMPUESTOS AVANZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS INDUSTRIALES* [Universidad Politécnica de Cataluña]. http://hdl.handle.net/10803/6162

Rodríguez Seijo, Andrés. (2022, May 13). *Microplásticos y suelo: una combinación desconocida y muy arriesgada*. National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/microplasticos-y-suelo-combinacion-desconocida-y-muy-arriesgada_16605

Rodríguez T, D. K. (2022, June 2). *Colombia produce 1,4 millones de toneladas de plástico al año*. Portafolio. https://www.portafolio.co/economia/colombia-produce-1-4-millones-de-toneladas-de-plastico-al-ano-566367

Romans Torres, I. (2015). Estudio y análisis de la construcción con balas de paja: comparación del sistema estructural “CUT” con la construcción convencional de hormigón armado. *Universitat Politècnica de València*.

Salcedo Cortés, O. M. (2015). *Madera plástica de pead (polietileno de alta densidad) reciclado como material estructural* [Universidad Nacional Autónoma de México]. https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000737075

Soto Ardila, C. C. (2022). *Sistema constructivo prefabricado (off site), análisis técnico para desarrollar su uso en la construcción de edificaciones en Colombia. “Estudio de caso un proyecto diseñado y construido en la ciudad de Bogotá.”* Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82159

Souza, E. (2020, August 9). *Fardos de paja: Construyendo muros eficientes con residuos de la agricultura*. Archdaily.

Vargas Isaza, C. A., Urrego Yepes, W., & Mena, J. (2022). Desempeño Mecánico de Compuestos de Madera Plástica de Matriz Poliolefínica. *Revista Lasallista de Investigación*, *19*, 265–284.

WWF. (2022, June 8). *Contaminación por plásticos: el eterno problema de los océanos*. https://www.wwf.org.co/?375810/Que-tan-grave-es-la-contaminacion-por-plasticos

Zhang, Y., Gao, T., Kang, S., & Sillanpää, M. (2019). Importance of atmospheric transport for microplastics deposited in remote areas. *Environmental Pollution*, *254*, 112953. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.121