



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
EDUCACIÓN ABIERTA Y A DISTANCIA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1704



Vigencia por seis años

UTILIZACIÓN DE RESIDUOS TEXTILES TRITURADOS PARA CREAR PANELES DIVISORIOS

Julieth Alejandra Gómez Rodríguez

Trabajo de grado

Directora:

María Paz Duque

Programa de Construcción en Arquitectura e Ingeniería

Facultad de Ingeniería

CAU Bucaramanga

Decanatura de División de Educación Abierta y a Distancia

Universidad Santo Tomás

2025

CONTENIDO

1	INTRODUCCION.....	6
1.1	JUSTIFICACIÓN	7
1.2	CONTEXTUALIZACIÓN	8
1.3	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	8
1.3.1	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	9
1.4	OBJETIVOS	9
1.4.1	OBJETIVO GENERAL	9
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
2	BASES TEÓRICAS Y DEFINICIONES CONCEPTUALES.....	10
2.1	ANTECEDENTES	10
2.1.1	PRODUCCIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS TEXTILES A NIVEL GLOBAL 10	
2.1.2	APLICACIÓN DE RESIDUOS TEXTILES EN LA CONSTRUCCIÓN.....	10
2.1.3	PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE LOS RESIDUOS TEXTILES EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN	11
2.1.4	NORMATIVAS Y REGULACIONES APLICABLES.....	11
2.2	MARCO TEÓRICO	12
2.2.1	INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR EN LA CONSTRUCCIÓN	12
2.2.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS TEXTILES	13

2.2.3	PROPIEDADES Y APLICACIONES DE PANELES CON RESIDUOS TEXTILES	13
2.2.4	CASOS DE ESTUDIO Y PROYECTOS EXISTENTES	14
2.2.5	NORMATIVAS Y REGULACIONES APLICABLES EN COLOMBIA Y EL MUNDO	14
2.2.6	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS BASADOS EN EL MARCO TEORICO.....	16
3	METODOLOGÍA.....	18
3.1	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	18
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	18
3.2.1	FABRICACIÓN DE LOS PANELES.....	19
3.3	INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	22
3.3.1	RECOLECCIÓN DE RESIDUOS TEXTILES.....	22
3.4	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	23
3.5	ANÁLISIS DE DATOS DE LA INVESTIGACIÓN	24
4	RESULTADOS	25
4.1	COMPORTAMIENTO DEL PORCENTAJE DE MEZCLA SEGÚN SU MANEJO Y ACABADO	25
4.1.1	PRIMERA FASE: ELECCIÓN DEL AGLOMERANTE	25
4.1.2	SEGUNDA FASE: DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA	27

4.2	COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE LOS PANELES EN CONDICIONES DE SATURACIÓN Y NO SATURACIÓN	29
4.2.1	MUESTRAS NO SATURADAS	30
4.2.2	MUESTRA SATURADAS CON AGUA	35
4.2.3	COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE LOS PANELES SATURADOS Y NO SATURADOS	40
4.2.4	DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD.....	40
4.3	COMPORTAMIENTO FISICO Y MECANICO DE LOS PANELES CON DIFERENTES TIEMPOS DE FRAGUADO.	41
4.3.1	PANELES CON 7 DÍAS DE FRAGUADO	41
4.3.2	PANELES CON 14 DÍAS DE FRAGUADO	44
4.3.3	PANELES CON 28 DÍAS DE PRAGUADO	46
4.3.4	COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS SEGÚN SU TIEMO DE FRAGUADO.....	49
4.4	PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PANELES EN SITUACIÓN DE INCENDIO	49
4.5	ANALISIS ECONOMICO Y AMBIENTAL.....	51
4.5.1	ANALISIS ECONOMICO.....	52
4.5.2	ANALISIS AMBIENTAL	53
5	CONCLUSIONES.....	55
6	RECOMENDACIONES PARA OTROS PROYECTOS	57

RESUMEN

Bucaramanga y su área metropolitana enfrentan una creciente problemática ambiental debido a la acumulación de residuos textiles, producto de la industria de la confección y el consumo masivo de ropa. La falta de estrategias para su aprovechamiento ha llevado a un aumento en la disposición inadecuada de estos materiales, generando contaminación y desaprovechando su potencial de reutilización. En este contexto, la presente investigación busca analizar la viabilidad de transformar residuos textiles en paneles divisorios para interiores, promoviendo una alternativa sostenible dentro del sector de la construcción en la región.

Este estudio adopta un enfoque experimental, recopilando información sobre la generación y gestión actual de residuos textiles en Bucaramanga, identificando posibles procesos de transformación y evaluando la factibilidad de su implementación en la elaboración de paneles divisorios. Se consideran aspectos técnicos, económicos y normativos para determinar la viabilidad del proyecto y su impacto en la sostenibilidad local.

Los resultados esperados incluyen la identificación de los beneficios del uso de residuos textiles en la construcción, su aceptación en el mercado local y su contribución a la reducción de desechos sólidos en la región. La investigación proporcionará información relevante para arquitectos, ingenieros y diseñadores interesados en soluciones innovadoras y sostenibles para la construcción.

Palabras clave: residuos textiles, sostenibilidad, construcción ecológica, paneles divisorios, economía circular, Bucaramanga.

ABSTRACT

Bucaramanga and its metropolitan area are facing a growing environmental problem due to the accumulation of textile waste, generated by the garment industry and mass clothing consumption. The lack of effective strategies for its utilization has led to increased improper disposal, causing pollution and wasting its reuse potential. In this context, this research aims to analyze the feasibility of transforming textile waste into decorative interior panels, promoting a sustainable alternative within the construction sector in the region.

This study adopts a descriptive approach, gathering information on the generation and current management of textile waste in Bucaramanga, identifying possible transformation processes, and evaluating the feasibility of their implementation in the manufacture of decorative panels. Technical, economic, and regulatory aspects are considered to determine the viability of the project and its impact on local sustainability.

Expected results include identifying the benefits of using textile waste in construction, its potential market acceptance, and its contribution to reducing solid waste in the region. This research provides valuable information for architects, engineers, and designers interested in innovative and sustainable construction solutions in Bucaramanga.

Keywords: textile waste, sustainability, eco-friendly construction, decorative panels, circular economy, Bucaramanga.

1 INTRODUCCION

Actualmente, la gestión inadecuada de los residuos textiles representa un importante desafío ambiental en diversas regiones del mundo, incluyendo Bucaramanga y su área metropolitana. La industria textil y el consumo acelerado de prendas de vestir generan grandes volúmenes de residuos que, en la mayoría de los casos, terminan en vertederos o se incineran, contribuyendo a la contaminación del suelo y a las emisiones de gases de efecto invernadero. Según las Naciones Unidas (ONU, 2019), se estima que la industria textil es responsable de aproximadamente el 10 % de las emisiones globales de carbono y el 20 % de las aguas residuales a nivel mundial. En el caso de Colombia, estudios recientes han demostrado que la generación de residuos textiles supera las 92 000 toneladas anuales, la mayoría de las cuales no recibe un tratamiento adecuado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). A nivel regional, Bucaramanga y su área metropolitana presentan una gestión limitada de estos residuos, que a menudo se eliminan con la basura común, lo que aumenta la presión sobre los vertederos locales.

Ante este problema, es necesario buscar alternativas sostenibles que reduzcan el impacto ambiental de estos residuos y promuevan su reutilización en sectores industriales, como la construcción. Este sector es uno de los principales consumidores de recursos naturales y generador de residuos sólidos, representando aproximadamente el 40% de los residuos globales (World Green Building Council, 2020). La exploración de nuevos materiales que incorporan componentes reciclados ha cobrado relevancia en las últimas décadas, en el marco de la economía circular y la construcción sostenible. En este contexto, el uso de residuos textiles triturados para la fabricación de paneles divisorios surge como una alternativa innovadora que podría contribuir a reducir el uso de cemento y otros materiales convencionales, sin comprometer la resistencia ni la funcionalidad de los elementos constructivos.

Este estudio se centra en la investigación, el diseño y la evaluación de paneles divisorios fabricados con una mezcla de cemento, agua y residuos textiles triturados. La propuesta busca determinar la viabilidad de este material en términos de resistencia mecánica, durabilidad y comportamiento al fuego, con base en la normativa técnica colombiana aplicable, como la NTC 4373:1997 (especificaciones y métodos de ensayo) y la ASTM E84 (método de prueba estándar para evaluar las características de combustión superficial de materiales de construcción).

La metodología del proyecto se divide en varias etapas. En primer lugar, se realiza una investigación documental sobre las propiedades de los residuos textiles y su compatibilidad con materiales cementicios. Se recolectan y trituran los residuos textiles de dos pequeñas fábricas de confección ubicadas en Lebrija, Santander. Posteriormente, se diseña y fabrica prototipos de

paneles divisorios mediante la mezcla y el moldeo de los materiales en condiciones controladas. Finalmente, se realizan pruebas de laboratorio para evaluar la resistencia, la absorción de agua y su comportamiento en diferentes condiciones.

Este estudio no solo busca verificar la viabilidad física y mecánica de los paneles divisorios de residuos textiles, sino también analizar su impacto ambiental y económico en comparación con los materiales tradicionales utilizados en el sector de la construcción. Se espera que los resultados contribuyan al desarrollo de soluciones innovadoras que promuevan la reutilización de residuos textiles y fomenten prácticas de construcción más sostenibles en Colombia. En este sentido, la investigación se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles), el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables) y el ODS 13 (Acción por el Clima), al promover la innovación en materiales de construcción, reducir los impactos ambientales y adaptarlos a las condiciones locales de producción y uso.

También es importante destacar que, si bien iniciativas internacionales han explorado el uso de residuos textiles en materiales de construcción, aún se requiere investigación local para evaluar su aplicabilidad. Factores como la disponibilidad y el costo del cemento en Colombia, la capacidad productiva de la industria de la construcción, las condiciones ambientales de la región y la dinámica económica local son cruciales para asegurar la viabilidad de esta propuesta. De esta manera, el proyecto busca no sólo dar respuesta a una problemática ambiental global sino también adaptarse a las condiciones y necesidades del contexto colombiano, generando conocimiento aplicable y transferible para el sector.

1.1 JUSTIFICACIÓN

En Bucaramanga y su área metropolitana, la inadecuada gestión de los residuos textiles representa un desafío ambiental significativo. La industria de la confección y el rápido consumo de ropa generan grandes volúmenes de desechos que, en su mayoría, terminan en vertederos o son quemados, agravando los problemas de contaminación y desperdicio de materiales potencialmente reutilizables.

Esta investigación se centra en la reutilización de residuos textiles para la fabricación de paneles divisorios destinados a interiores de edificaciones en la región. La justificación radica en la necesidad de reducir el impacto ambiental de estos residuos y fomentar una economía circular. Además, el estudio busca generar conocimiento sobre nuevas aplicaciones de materiales reciclados que puedan integrarse en el sector de la construcción, brindando soluciones innovadoras y sostenibles que disminuyan la dependencia de recursos convencionales.

Dado el crecimiento urbano de Bucaramanga y la necesidad de implementar prácticas de construcción más sostenibles, la propuesta de paneles divisorios a partir de residuos textiles no solo contribuiría a mitigar la acumulación de desechos, sino que también impulsaría la

diversificación de materiales en el sector, generando oportunidades económicas y promoviendo una cultura de aprovechamiento de residuos en la ciudad.

1.2 CONTEXTUALIZACIÓN

El problema de los residuos textiles en Bucaramanga y su área metropolitana está directamente relacionado con la falta de programas efectivos de reciclaje y reutilización de estos materiales. A nivel local, los residuos textiles representan un porcentaje creciente de los residuos sólidos, con pocas alternativas de reciclaje aparte de la reventa informal o la disposición final en vertederos.

Desde una perspectiva ambiental, la acumulación de residuos textiles genera impactos negativos, como la contaminación del suelo y el agua debido a los tintes y productos químicos utilizados en su fabricación. En términos económicos, el uso de estos residuos en la fabricación de paneles divisorios puede representar una oportunidad para reducir los costos de adquisición de materiales de construcción, además de promover la creación de empleo en el sector del reciclaje y la fabricación de nuevos productos.

A nivel local, Bucaramanga se caracteriza por una sólida tradición en las industrias textil, de la confección y del calzado, sectores que generan una parte significativa del empleo formal e informal en la región. Sin embargo, estas actividades también generan un alto volumen de residuos en las etapas de corte y fabricación, que a menudo se desechan sin un aprovechamiento adecuado. Además, el sector de la construcción en Bucaramanga y su región metropolitana es uno de los motores económicos más dinámicos, con una alta demanda de materiales para proyectos de vivienda y urbanismo. Esto representa una oportunidad para incorporar soluciones innovadoras y sostenibles, como los paneles fabricados con residuos textiles.

Tecnológicamente, la transformación de residuos textiles en paneles requiere procesos de compactación, tratamiento y acabado que garanticen su resistencia, durabilidad y estética. En términos regulatorios, es fundamental evaluar la normativa local y nacional relativa al uso de materiales reciclados en la construcción, así como los requisitos de calidad y seguridad, para garantizar su viabilidad en el mercado.

Situar esta investigación en el contexto de Bucaramanga y su región metropolitana nos permite abordar un problema específico con un enfoque práctico, ofreciendo soluciones concretas para reducir el impacto de los residuos textiles en la región y promover alternativas sostenibles en el sector de la construcción.

1.3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La creciente acumulación de residuos textiles sin un adecuado tratamiento o reutilización genera impactos negativos en el medio ambiente y limita las oportunidades de aprovechamiento dentro de la economía circular. A pesar de los avances en la sostenibilidad dentro del sector de la

construcción, aún no se han explorado a profundidad las posibilidades de integrar residuos textiles en materiales de construcción innovadores y funcionales.

El problema central de esta investigación radica en la falta de estrategias y procesos efectivos para convertir estos residuos en materiales útiles dentro del sector de la construcción, específicamente en paneles divisorios para interiores. Esto plantea interrogantes sobre la viabilidad técnica, económica y normativa de la transformación de los residuos textiles en un producto funcional y sostenible que pueda implementarse en la construcción local.

1.3.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Se pueden utilizar los residuos textiles para crear paneles divisorios en el sector de la construcción?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento físico y mecánico de paneles divisorios elaborados con residuos textiles y cemento, con el fin de evaluar su potencial aplicación en la construcción de edificaciones.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar diferentes porcentajes de cemento y residuo textil para determinar la cantidad óptima en función de su manejo y acabado.
- Analizar el comportamiento de los paneles elaborados con residuos siguiendo los criterios de resistencia mecánica, absorción y durabilidad establecidos en la normatividad vigente en condiciones de saturación y no saturación en agua.
- Examinar la variación de la resistencia de los paneles en función de diferentes tiempos de fraguado.
- Elaborar una propuesta para el análisis del comportamiento de los paneles en situación de incendio.
- Evaluar la viabilidad ambiental y económica de la fabricación y aplicación de estos paneles en el sector de la construcción.

2 BASES TEÓRICAS Y DEFINICIONES CONCEPTUALES

2.1 ANTECEDENTES

La problemática ambiental derivada de los residuos textiles ha cobrado relevancia en los últimos años debido al crecimiento exponencial de la industria de la moda y el rápido ciclo de consumo de prendas de vestir. La gestión inadecuada de estos desechos ha generado un impacto significativo en los ecosistemas, lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras para su aprovechamiento en diferentes sectores, entre ellos, la construcción.

2.1.1 PRODUCCIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS TEXTILES A NIVEL GLOBAL

Según datos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2023), anualmente se generan más de 17 millones de toneladas de residuos textiles en el mundo, de los cuales menos del 15% se reciclan o reutilizan. La Unión Europea, por su parte, ha establecido regulaciones estrictas para el tratamiento de residuos textiles, promoviendo estrategias de economía circular que buscan reducir el impacto ambiental de la industria textil (European Environment Agency, 2023).

En América Latina, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2022) ha identificado el manejo inadecuado de los residuos textiles como un desafío ambiental y social, destacando la necesidad de implementar políticas de reciclaje y reutilización. En Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2023) ha impulsado estrategias para la gestión de estos residuos, aunque aún existen barreras económicas y técnicas para su integración en nuevos productos.

2.1.2 APLICACIÓN DE RESIDUOS TEXTILES EN LA CONSTRUCCIÓN

Varios estudios han explorado el uso de residuos textiles como material alternativo en la fabricación de paneles y elementos constructivos. Investigaciones realizadas por la Universidad Politécnica de Madrid han demostrado que la incorporación de fibras textiles en paneles para edificaciones mejora sus propiedades térmicas y acústicas, reduciendo la demanda energética

de los edificios y promoviendo una economía circular en la industria de la construcción (Residuos Profesional, 2024).

En España, la empresa Kooperera ha desarrollado paneles aislantes a partir de residuos textiles de algodón, destacando su capacidad para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones y disminuir la generación de desechos textiles (Residuos Profesional, 2023). De manera similar, Eldacorcho, respaldada por Ivace+i, ha impulsado la fabricación de paneles decorativos utilizando textiles reciclados, lo que evidencia una creciente tendencia hacia la aplicación de estos materiales en interiores de construcciones sostenibles (IVACE+i, 2024).

En Francia, la startup FabBrick ha desarrollado una tecnología que permite compactar residuos textiles en bloques utilizados para revestimientos decorativos. Este material ha sido implementado en diversas edificaciones, demostrando un alto potencial de integración en el sector de la construcción sostenible (FabBrick, 2023).

2.1.3 PROPIEDADES MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE LOS RESIDUOS TEXTILES EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

En el ámbito académico, una investigación de la Universidad La Salle evaluó las propiedades mecánicas y físicas de paneles de drywall fabricados con residuos textiles de algodón, utilizando como aglomerante uno hecho por yuca. Los resultados concluyen que estos paneles tienen características comparables a las de los paneles convencionales en términos de resistencia y durabilidad. Además, destacan por su función principal como aislantes térmicos y acústicos. Lo que los convierte en una alternativa viable para la construcción (La Salle, 2023).

Según Castillo Rodríguez y García Navarro (2023), se analizó la incorporación de residuos textiles de algodón posconsumo en compuestos de yeso, demostrando mejoras en la resistencia y el comportamiento mecánico del material. Otros estudios han evaluado la capacidad aislante de estos compuestos, concluyendo que pueden reducir la pérdida de calor en los edificios hasta en un 30%, mejorando su eficiencia térmica y reduciendo los costes energéticos (Universidad Politécnica de Cataluña, 2024).

2.1.4 NORMATIVAS Y REGULACIONES APLICABLES

El uso de residuos textiles en la construcción debe cumplir con diversas normativas nacionales e internacionales. En Colombia, Las NORMAS NTC 6421:2021: AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS PARA USO EN EL CONCRETO HIDRÁULICO, establece los requisitos de calidad y las orientaciones aplicables para el empleo de agregados gruesos reciclados (AGR) en concretos hidráulicos, tanto estructurales como no estructurales, descartando su aplicación en bases, subbases o afirmados de pavimentos y excluyendo los agregados finos reciclados (AFR) dada la falta de consenso técnico internacional sobre su uso. Y la norma NTC 6422:2021: ENSAYO DE CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES DE LOS AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS, describe un método de ensayo de referencia para

identificar y estimar las proporciones relativas de los distintos componentes que conforman los agregados gruesos reciclados, con el fin de verificar su idoneidad para su uso en mezclas de concreto y otros materiales de construcción.

Asimismo, la Norma Colombiana de Resistencia a los Terremotos (NSR-10) constituye un marco regulatorio esencial, ya que establece los lineamientos técnicos y estructurales para garantizar la seguridad de las edificaciones ante amenazas sísmicas. Si bien los residuos textiles aplicados a paneles de partición no estructurales no forman parte de los elementos portantes de una edificación, su integración debe evaluarse de acuerdo con la NSR-10, en particular en lo que respecta a los requisitos mínimos de resistencia, resistencia al fuego y desempeño como elementos no estructurales en edificaciones seguras y habitables (AIS, 2010).

A nivel internacional, la norma ISO 14021 define los criterios para certificar materiales reciclados en la construcción, garantizando su seguridad y desempeño estructural (ISO, 2023). En Europa, el Reglamento de Productos de Construcción (UE, 2023) establece requisitos específicos para el uso de materiales reciclados en edificaciones, promoviendo su integración en proyectos arquitectónicos sostenibles.

En Bucaramanga y su área metropolitana, el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS, 2023) establece estrategias para la gestión de residuos textiles, aunque aún no existe una normativa específica para su aplicación en la construcción. Esto representa una oportunidad para desarrollar normativas locales que promuevan el uso de estos materiales en la arquitectura sostenible.

Este contexto demuestra el creciente interés en el uso de residuos textiles en la construcción, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental de la industria textil y promover el desarrollo de materiales sostenibles. La aplicación de estos residuos en paneles no solo representa una solución innovadora para la gestión de residuos, sino que también abre nuevas oportunidades en el diseño arquitectónico y la construcción sostenible.

Dado el potencial de estos materiales en la construcción sostenible, es fundamental seguir explorando su viabilidad técnica y económica, así como desarrollar normativas que permitan su integración en proyectos de arquitectura sostenible. La creciente demanda de materiales sostenibles en la construcción representa una oportunidad para transformar los residuos textiles en recursos valiosos para el sector.

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD Y ECONOMÍA CIRCULAR EN LA CONSTRUCCIÓN

El desarrollo sostenible es un concepto clave en el contexto de la arquitectura y la ingeniería moderna. La Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED, 1987) define

el desarrollo sostenible como aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. En este marco, la economía circular ha surgido como un paradigma alternativo a la economía lineal, priorizando la reutilización y el reciclaje de materiales en lugar de su eliminación (EMF, 2021).

En la industria de la construcción, la implementación de estrategias de economía circular se ha convertido en una necesidad para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia de los recursos. En este contexto, los residuos textiles se presentan como un problema crítico, debido a su volumen creciente y a la falta de alternativas adecuadas para su reutilización o reciclaje (García-Salmones Chobotov, 2021). La aplicación de estos residuos en la fabricación de materiales constructivos, como paneles, podría ofrecer una solución viable y sostenible para la gestión de estos desechos.

La Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC), desarrollada por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo (2023), busca impulsar al país hacia un modelo de producción y consumo más sostenible, eficiente y circular. La estrategia tiene como objetivo optimizar los recursos, reducir los residuos y valorizar los materiales posconsumo, lo que promueve la innovación y la colaboración entre fabricantes, ciudadanos y universidades. En este contexto, el uso de residuos para crear paneles divisorios se alinea con esta estrategia y contribuye a reducir la huella de carbono, optimizar su uso y crear productos con menor impacto ambiental.

2.2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS TEXTILES

Los residuos textiles pueden clasificarse en dos tipos principales:

Residuos textiles preconsumo: Son aquellos generados durante los procesos de manufactura de textiles, tales como recortes de tela, defectos de fabricación y excedentes de producción (Shen et al., 2020).

Residuos textiles posconsumo: Son prendas de vestir y textiles descartados tras su uso, los cuales suelen terminar en vertederos o ser incinerados, contribuyendo significativamente a la contaminación ambiental (Smith & Williams, 2021).

El aprovechamiento de estos residuos en el sector de la construcción no solo reduce la cantidad de desechos enviados a rellenos sanitarios, sino que también permite el desarrollo de materiales innovadores con propiedades térmicas, mecánicas y acústicas mejoradas (García-Martínez et al., 2023).

2.2.3 PROPIEDADES Y APLICACIONES DE PANELES CON RESIDUOS TEXTILES

La incorporación de residuos textiles en paneles decorativos para construcción ha sido objeto de diversas investigaciones. Los estudios han demostrado que estos paneles presentan propiedades técnicas relevantes, tales como:

Aislamiento térmico: Gracias a la estructura porosa de los residuos textiles, los paneles fabricados con estos materiales pueden mejorar la eficiencia energética de los edificios al reducir la transferencia de calor (Rodríguez & Pérez, 2023).

Absorción acústica: Las fibras textiles permiten la absorción de sonido, disminuyendo la reverberación y el ruido ambiental en espacios interiores (López et al., 2022).

Resistencia estructural: Dependiendo del tipo de aglutinante utilizado (resinas, cementos o adhesivos ecológicos), los paneles pueden alcanzar niveles de resistencia mecánica adecuados para su uso en interiores (Martínez & Rojas, 2021).

2.2.4 CASOS DE ESTUDIO Y PROYECTOS EXISTENTES

Diversos proyectos han demostrado la viabilidad del uso de residuos textiles en la construcción. Algunos ejemplos destacados incluyen:

FabBrick (Francia): Empresa pionera en la fabricación de ladrillos decorativos a partir de residuos textiles prensados con resinas biodegradables. Estos ladrillos han sido utilizados en el diseño de interiores y exhibiciones arquitectónicas sostenibles (FabBrick, 2023).

Recy-Block (España): Iniciativa que desarrolla bloques modulares para construcción sostenible utilizando residuos textiles y plásticos reciclados. Estos bloques han sido empleados en proyectos de vivienda ecológica (Martín et al., 2023).

TextilEco (México): Programa de investigación que explora el uso de fibras recicladas de algodón y poliéster en la fabricación de paneles aislantes para edificaciones residenciales y comerciales (González & Vargas, 2022).

Estos casos de estudio proporcionan una base sólida para considerar la implementación de tecnologías similares en Bucaramanga, con el objetivo de reducir el impacto ambiental de los residuos textiles y promover la economía circular en el sector de la construcción.

2.2.5 NORMATIVAS Y REGULACIONES APLICABLES EN COLOMBIA Y EL MUNDO

El desarrollo de paneles decorativos a partir de residuos textiles debe cumplir con regulaciones y normativas que garanticen su seguridad, desempeño mecánico y viabilidad en el mercado. En el contexto colombiano e internacional, se destacan las siguientes:

Normas ICONTEC: Regulan los materiales utilizados en la construcción y establecen requisitos de seguridad estructural, resistencia al fuego y durabilidad (ICONTEC, 2022).

NTC 4373:1997 – Materiales de construcción. Ensayos de características, métodos de control y ensayo

Esta norma establece los procedimientos de ensayo para determinar propiedades físicas y mecánicas de materiales de construcción como la densidad aparente, absorción de agua, resistencia a la compresión y flexión.

- **Fórmula aplicada para densidad aparente:**

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde **m** es la masa de la probeta (kg) y **V** su volumen (m³).

- **Resistencia a la flexión o Módulo de Ruptura:**

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

Donde **P** es la carga máxima aplicada (N), **L** la distancia entre apoyos (mm), **b** el ancho de la probeta (mm) y **e** su espesor (mm). Su medida es en MPa.

Estas propiedades son esenciales para evaluar la viabilidad de los paneles de residuos textiles como sustitutos de materiales convencionales en construcción.

La clasificación de los materiales según la NTC 4373 en el ensayo de flexión se establece en dos categorías principales:

Tipo A: para paneles de uso externo que van a estar expuestos directamente al sol y enumerados según su resistencia.

Tipo B: para paneles de uso interno y externo que no están expuestos directamente al sol o la lluvia y enumerados según su resistencia.

Tabla 1: Clasificación de los paneles según su módulo de ruptura.

CATEGORIA	MOR Mínimo	
	Placas tipo A	Placas tipo B
1	---	4
2	---	7
3	7	10
4	13	16
5	18	22

ASTM E84 — método de prueba estándar para evaluar las características de combustión superficial de materiales de construcción.

A nivel internacional, la norma ASTM E84 (American Society for Testing and Materials) establece el método estándar para evaluar las características de combustión superficial de los materiales de construcción. Este ensayo mide dos parámetros fundamentales:

- **Índice de propagación de la llama (Flame Spread Index – FSI):** Indica la velocidad con la que una llama se propaga sobre la superficie del material.
- **Índice de desarrollo de humo (Smoke Developed Index – SDI):** Evalúa la cantidad de humo que se genera durante la combustión.

El procedimiento se realiza en un equipo denominado “**Steiner Tunnel**”, donde una muestra del material se somete a una llama controlada para determinar su comportamiento frente al fuego.

De acuerdo con los resultados, los materiales se clasifican en tres categorías:

Clase A (I): Alta resistencia al fuego (FSI de 0 a 25).

Clase B (II): Resistencia media al fuego (FSI de 26 a 75).

Clase C (III): Baja resistencia al fuego (FSI de 76 a 200).

La ASTM E84 es ampliamente utilizada en Estados Unidos y adoptada como referencia en múltiples países, incluyendo Colombia, para evaluar la seguridad contra incendios de materiales innovadores o alternativos. Su aplicación en esta investigación resulta esencial para determinar la capacidad de los paneles con residuos textiles de retardar la propagación de la llama y reducir la emisión de humo, garantizando condiciones seguras en edificaciones.

En conjunto, la **NTC 4373:1997** y la **ASTM E84** proporcionan un marco técnico integral para evaluar tanto el desempeño mecánico como la seguridad frente al fuego de los paneles desarrollados, asegurando su cumplimiento con los estándares exigidos por el sector de la construcción sostenible.

2.2.6 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS BASADOS EN EL MARCO TEORICO

La reutilización de residuos textiles en la fabricación de paneles decorativos representa una oportunidad para mejorar la sostenibilidad de la industria de la construcción. La evidencia recopilada en diversas investigaciones sugiere que estos materiales pueden ofrecer beneficios significativos en términos de aislamiento térmico, absorción acústica y reducción del impacto ambiental.

Para la implementación exitosa de estos materiales en el mercado local, es necesario:

- Desarrollar normativas que regulen su producción y certificación.
- Fomentar la inversión en investigación y desarrollo de materiales basados en residuos textiles.
- Generar alianzas entre el sector académico, industrial y gubernamental para incentivar la economía circular.

En conclusión, el desarrollo de paneles divisorios con residuos textiles es una alternativa innovadora y viable para el sector de la construcción, con el potencial de transformar la gestión de residuos y contribuir a una arquitectura más sostenible.

3 METODOLOGÍA

3.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

La investigación se llevó a cabo con un enfoque experimental y descriptivo. En la fase inicial, se revisó información relacionada con las normas de construcción, las características de los residuos textiles y las experiencias previas con el uso de materiales reciclados en la industria. Esta fase documental permitió establecer los criterios técnicos y de rendimiento que se considerarían para el diseño de los prototipos.

Posteriormente, mediante análisis cualitativo, se crearon pequeños prototipos de 10 cm x 10 cm x 1 cm, en los que se probaron diferentes proporciones de residuos textiles y cemento. El objetivo de estas pruebas iniciales fue identificar una mezcla que ofreciera un buen manejo y comportamiento de la mezcla.

En primer lugar, se realizaron pruebas comparativas en seis paneles iniciales, tres de los cuales se saturaron con agua y tres se mantuvieron secos. Este procedimiento buscó determinar la variabilidad en los resultados de resistencia al comparar materiales en diferentes condiciones de humedad. Asimismo, se realizó una prueba adicional para identificar el efecto del tiempo de fraguado del cemento en el comportamiento mecánico del material. Para ello, se prepararon seis paneles adicionales, dos se probaron tras 7 días de fraguado, dos tras 14 días y dos tras 28 días. Esta comparación permitió determinar si existían variaciones significativas en la resistencia del panel en función del tiempo de curado, lo cual es esencial para comprender la evolución de las propiedades del material y su viabilidad en la construcción civil.

Finalmente, los resultados experimentales se complementaron con un análisis cualitativo que tuvo como objetivo evaluar tanto el impacto ambiental como la viabilidad económica del uso de residuos textiles en la producción de paneles divisorios.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

La investigación se enfoca en la construcción sostenible en Bucaramanga y su área metropolitana. La muestra estará conformada por prototipos de paneles elaborados con 5% de residuos textiles y 95% de cemento.

Para definir la muestra se considerarán:

- Muestras saturadas y NO saturadas de agua.
- Muestras con 7, 14 y 28 días de fraguado.
- Dimensiones estándar: Paneles de 250mm x 500 mm x 10 mm en pruebas iniciales.
- Viabilidad normativa: Evaluación de la compatibilidad con regulaciones colombianas.

3.2.1 FABRICACIÓN DE LOS PANELES

Tras la recopilación de información y la recolección de residuos, se procederá a la fabricación de los paneles siguiendo estos pasos:

- **Paso 1:** Corte y trituración del residuo textil: Los retazos fueron inicialmente cortados en tiras de aproximadamente 1 cm de ancho usando tijeras para tela. Posteriormente, se procedió a triturar las tiras hasta obtener fragmentos de aproximadamente $1\text{cm} \times 1\text{cm}$, con forma irregular. Este tamaño favorece una adecuada dispersión en la mezcla y una mejor adherencia con el cemento.



Imagen 1: Triturado de tela.

- **Paso 2:** Preparación del molde: Se construyó un molde rectangular con balsos rígidos y silicona líquida, con las dimensiones estándar de:
Largo: 500 mm
Ancho: 250 mm
Espesor: 10 mm
Los bordes del molde fueron sellados cuidadosamente con silicona para evitar filtraciones durante el vertido.
Se dejó secar el molde durante al menos 2 horas antes de su uso para asegurar su rigidez y estanqueidad.



Imagen 2: Molde hecho de balsa.

- **Paso 3:** Medición de los materiales: Para una unidad de panel, se empleó la siguiente proporción:
Cemento: 1,829 gramos
Agua: 750 mililitros
Residuos textiles triturados: 97 gramos.

Estas medidas fueron calculadas utilizando un valor común para textiles de baja densidad de $1,4 \text{ g/cm}^3$ derivada del análisis de la literatura. Los materiales fueron medidos individualmente con una gramera digital.



Imagen 3: Cantidad de residuo textil utilizado para 1 muestra.



Imagen 4: Cantidad de cemento utilizado para 1 muestra.

- **Paso 4: Mezcla de los componentes:** En un recipiente plástico, se colocaron primero el cemento y el agua, y fueron mezclados hasta tener una masa consistente y posteriormente, se añadió el residuo textil lentamente, mientras se mezclaba de forma continua, hasta obtener una consistencia pastosa, homogénea y libre de grumos.



Imagen 5: Mezcla de todos los materiales.

- **Paso 5:** Vertido en el molde: Se impregna el molde de aceite para que sea más fácil el desmolde. Se vertió una primera capa de mezcla en el fondo del molde, extendiéndola con una espátula y presionándola ligeramente para eliminar bolsas de aire. Luego se completó el llenado del molde con el resto de la mezcla, nivelando la superficie final cuidadosamente donde, pequeños golpes al molde para que las burbujas salgan y se extienda mejor la mezcla. Se evitó añadir agua adicional durante este proceso para no alterar la proporción original.



Imagen 6: Mezcla recién vertida en el molde.

3.3 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Antes de la fabricación de los paneles, se realizó una investigación documental sobre:

- Normativas de construcción en Colombia aplicables a paneles divisorios.
- Propiedades mecánicas y físicas de residuos textiles en combinación con materiales aglomerantes.
- Ejemplos de materiales reciclados en construcción y su desempeño.
- Impacto ambiental de los residuos textiles en Bucaramanga y su área metropolitana.

Las fuentes incluyen artículos científicos, documentos técnicos y regulaciones nacionales.

3.3.1 RECOLECCIÓN DE RESIDUOS TEXTILES

Los residuos textiles utilizados en esta investigación se obtienen hasta el momento de dos pequeñas fábricas de confección ubicadas en Lebrija, Santander. Los retazos de tela desechados por estas fábricas son recolectados y posteriormente triturados para su incorporación en la mezcla de los paneles. Al tratarse de retazos provenientes directamente de fábricas, no requieren tratamientos previos como lavado, clasificación o retiro de avíos.

La elección de estos residuos responde a la necesidad de reducir el impacto ambiental del sector textil, promoviendo una alternativa sostenible en la construcción.

3.4 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

Con el objetivo de determinar las propiedades físicas y mecánicas de los paneles elaborados a base de residuos textiles y cemento, se diseñó una serie de ensayos experimentales bajo condiciones controladas. Para ello, se fabricaron 12 paneles con la misma dosificación de materiales: 5% de residuo textil triturado y 95% de cemento, proporciones determinadas previamente en la etapa de formulación como óptimas para lograr una mezcla homogénea y moldeable.

El primer grupo de seis paneles fueron divididos en dos grupos de tres unidades cada uno. El primer grupo fue sometido a un proceso de saturación en agua durante 24 horas, con el fin de evaluar el comportamiento del material en condiciones de alta humedad. El segundo grupo se mantuvo en estado seco, sin ningún tipo de tratamiento previo, para servir como grupo de control.

El segundo grupo de seis paneles, se dividió en tres grupos de dos unidades cada uno: el primero con un tiempo de fraguado de 7 días, el segundo de 14 días y el tercero de 28 días. El propósito de esta división fue determinar si la capacidad de resistencia varía en función del tiempo de secado de cada panel.

Posteriormente, todas las muestras fueron ensayadas en la máquina multiensayos, aplicando el ensayo de flexión conforme a los lineamientos establecidos en la norma NTC 4373:1997. Durante este procedimiento, se utilizaron las mismas luces de apoyo y se aplicó una carga constante sobre el centro de cada panel, garantizando condiciones uniformes y comparables entre las muestras. El objetivo principal fue observar la resistencia a la flexión de los paneles, así como analizar el modo en que estas fallan al ser sometidas a esfuerzos mecánicos.

Una vez realizadas las pruebas de flexión, se procedió al análisis de absorción de agua. Para ello, se utilizaron los paneles ya fallados (tanto saturados como secos), las cuales fueron saturadas en agua otras 24 horas y después introducidas en un horno de secado hasta alcanzar un peso constante. Este proceso permitió calcular con precisión la cantidad de agua absorbida por cada muestra. El procedimiento de medición también se realizó conforme a lo estipulado en la norma NTC 4373:1997, la cual establece los pasos para evaluar este tipo de propiedades físicas en materiales de construcción no tradicionales.

Con estos ensayos se busca obtener una caracterización integral del comportamiento del material propuesto, evaluando su desempeño tanto en condiciones secas como húmedas y diferentes tiempos de fraguado, lo que permitirá definir su viabilidad como elemento constructivo.

3.5 ANÁLISIS DE DATOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los datos obtenidos a partir de los ensayos fueron analizados en comparación con las propiedades técnicas de los paneles comerciales tipo Superboard, con el propósito de evaluar la viabilidad del material propuesto como una alternativa funcional en aplicaciones similares.

Para el análisis mecánico, se utilizó la fórmula del módulo de ruptura establecida en la norma NTC 4373:1997, lo que permite determinar la resistencia a la flexión de cada una de las muestras. Asimismo, se calculó la absorción de agua de los paneles a partir de los datos de masa antes y después del secado. Adicionalmente, se realizó un análisis estadístico descriptivo que incluye el cálculo de la media aritmética, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación, con el fin de obtener una comprensión más precisa del comportamiento de los paneles y de la consistencia de los resultados obtenidos.

Finalmente, se compararon los resultados de los paneles saturadas con los de las no saturadas, así como los correspondientes a los distintos tiempos de fraguado, con el objetivo de identificar posibles variaciones en el desempeño del material bajo diferentes condiciones de humedad y secado.

4 RESULTADOS

4.1 COMPORTAMIENTO DEL PORCENTAJE DE MEZCLA SEGÚN SU MANEJO Y ACABADO

Se elaboraron diez muestras con diferentes proporciones de material aglomerante (cemento gris, cemento blanco y yeso) mezclado con residuo textil triturado, con el fin de identificar la combinación más adecuada en cuanto a manejo, acabado superficial y resistencia al lavado.

4.1.1 PRIMERA FASE: ELECCIÓN DEL AGLOMERANTE

En esta primera etapa se realizaron tres muestras para comparar el comportamiento del cemento gris, cemento blanco y yeso como materiales aglomerantes.

Muestra 1: Cemento gris + residuo textil (20% cemento y 80% residuo textil). La mezcla presentó baja manejabilidad y un acabado irregular. Durante el secado, las caras del panel mostraron desprendimiento del residuo textil, el cual podía retirarse fácilmente con las manos o herramientas.



Imagen 7: Cara 1 mezcla cemento y residuo textil.



Imagen 8: Cara 2 mezcla de cemento y residuo textil.

Muestra 2: Cemento blanco + residuo textil (50% de cada componente). Se obtuvo una mezcla más homogénea y manejable, aunque un poco difícil de compactar en el molde. El acabado final fue uniforme y de buena apariencia estética; sin embargo, el material presentó baja resistencia mecánica, además este aglomerante tiene un mayor costo en el mercado.



Imagen 9: Cara 1 mezcla cemento blanco y residuo textil.



Imagen 10: Cara 2 mezcla cemento blanco y residuo textil.

Muestra 3: Yeso + residuo textil (50% de cada componente). Esta mezcla resultó muy manejable y de fácil aplicación, aunque con un tiempo de fraguado prolongado. Se evidenció una alta retención de humedad, y al entrar en contacto con agua, el yeso tendió a lavarse y desintegrarse.



Imagen 11: Cara 1 mezcla yeso y residuo textil.



Imagen 12: Cara 2 mezcla yeso y residuo textil.

4.1.2 SEGUNDA FASE: DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA

Con base en lo anterior, se elaboraron siete nuevas muestras empleando exclusivamente cemento gris como aglomerante, dado que los otros dos aglomerantes no cuentan con las características físicas y mecánicas que concuerden con los objetivos de la investigación. Además se varió el porcentaje de residuo textil para identificar la mezcla con mejores características de manejabilidad, cohesión y acabado superficial.

Muestras 4 y 5: 70% residuo textil – 30% cemento. Estas mezclas presentaron baja trabajabilidad, tanto en el proceso de mezclado como al momento de vaciarlas en los moldes. Aunque el acabado superficial fue aceptable, se observó que el residuo textil quedaba expuesto en los bordes. Durante la prueba de lavado, el material se desintegró parcialmente, evidenciando pérdida del aglomerante.



Imagen 13: Caras 70% residuo y 30% cemento.

Muestras 6 y 7: 50% residuo textil – 50% cemento. Se logró una mezcla más estable y manejable, aunque todavía con una textura algo rígida. El acabado fue mejor, pero el residuo textil superficial se desprendía con el cepillado y lavado, ocasionando pérdida de material cementicio.



Imagen 14: Caras 50% residuo y 50% cemento.

Muestra 8: 20% residuo textil – 80% cemento. Esta proporción mostró una notable mejora en la manejabilidad y mayor cohesión. No obstante, aún se evidenciaban zonas con fibras textiles expuestas, lo que facilitaba su desgaste y pérdida de material al contacto con el agua.



Imagen 15: Cara 20% residuo y 80% cemento.

Muestras 9 y 10: 5% residuo textil – 95% cemento. Estas muestras resultaron óptimas en su manejo y acabado. La mezcla fue homogénea, pastosa y fácil de moldear, con una textura similar a la pasta dental. Los paneles obtenidos presentaron superficies lisas, bordes definidos y sin residuos expuestos. Durante las pruebas de lavado y cepillado, no se observó desprendimiento ni pérdida de material cementicio, por lo que esta composición fue

seleccionada como la más adecuada para fabricar los paneles que serían sometidas a los ensayos de resistencia física y mecánica.



Imagen 16: Caras 5% residuo y 95% cemento.

4.2 COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE LOS PANELES EN CONDICIONES DE SATURACIÓN Y NO SATURACIÓN

Se ensayaron seis muestras para analizar su comportamiento bajo carga: tres en estado no saturado y tres previamente saturadas con agua, para evaluar la variación de la resistencia en función del contenido de humedad del material. Las muestras se sometieron a falla tras un período de curado de cuatro días. Las pruebas se realizaron en una máquina multiensayo con una configuración de soporte específica: El punto de aplicación de la carga se ubicó a 250 mm de un extremo, mientras que los soportes de la base se ubicaron a 125 mm de cada extremo, generando una luz efectiva de 250 mm. Se aplicó una carga constante a cada muestra, diseñada para inducir la falla dentro de los primeros 10 segundos de la prueba. Estas pruebas se realizaron de acuerdo con la norma NTC 4373:1997 – Materiales de Construcción. Pruebas Características, Métodos de Control y Pruebas, descrita anteriormente.



Imagen 17: Máquina Multiensayos.



Imagen 18: Comprobación del tamaño de los apoyos.



Imagen 19: Comprobación de las medidas de los puntos de apoyo.



Imagen 20: Panel listo para fallar.

A continuación, se presentan los datos obtenidos en el proceso.

4.2.1 MUESTRAS NO SATURADAS

- **Muestra 1:** La probeta fue ensayada en condición seca, alcanzando una carga máxima de **196 N** en el momento de la falla. Al tratarse de la primera muestra ensayada, se observó que el panel no presentó separación inmediata; por el contrario, la grieta se generó de forma progresiva hasta ser visualizada.



Imagen 21: Visualización de la falla.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)**, así como el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación establecida en la Norma correspondiente.



Imagen 22: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(196)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{147000}{50000}$$

$$R = 2,94 \text{ MPa}$$

- **Muestra 2:** La probeta fue ensayada en condición seca, alcanzando una carga máxima de **177 N** en el momento de la falla. Se evidenció un comportamiento similar al observado en la primera muestra, ya que la grieta se desarrolló de manera progresiva sin que el panel presentara separación inmediata.



Imagen 23: Aparición de grieta después de fallada.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, realizado con base en la ecuación establecida en la Norma correspondiente.



Imagen 24: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(177)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{132750}{50000}$$

$$R = 2,65 \text{ MPa}$$

- **Muestra 3:** La probeta fue ensayada en condición seca, alcanzando una carga máxima de **213 N** al momento de la falla. Presentó un comportamiento de fractura similar al de las dos primeras muestras. Al igual que en los casos anteriores, la grieta se desarrolló progresivamente sin producir una separación del panel.



Imagen 25: Aparición de grieta después de fallada.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 26: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(213)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{159750}{50000}$$

$$R = 3,19 \text{ MPa}$$

- **Comparación de las 3 muestras:** Se evidenció un comportamiento muy similar en las tres muestras, tanto en los tiempos de falla como en las deformaciones y resistencias alcanzadas, lo que indica una tendencia consistente en su desempeño. Los valores obtenidos presentan diferencias mínimas entre sí, lo que respalda la uniformidad del material analizado.
A continuación, se presenta un análisis estadístico que facilita la comprensión y comparación de los datos registrados.

Tabla 2: Comparación de resultados de muestras NO saturadas.

Muestra	Módulo de rotura
1	2,94 MPa
2	2,65 MPa
3	3,19 MPa

Estadística

Promedio de Resistencia = 2,92 MPa

Varianza = 0,073

Desviación estándar = 0,27

Coefficiente de Variación = 0.092

4.2.2 MUESTRA SATURADAS CON AGUA

- **Muestra 1:** La probeta fue ensayada en condición de saturación, alcanzando una carga máxima de **188 N** en el momento de la falla. Al tratarse de la primera muestra bajo esta condición, no se registraron comportamientos atípicos en comparación con las probetas ensayadas en estado seco, evidenciándose un comportamiento similar en el proceso de fractura.



Imagen 27: Muestra de la grieta después de fallada.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 28: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura.

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(188)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{141000}{50000}$$

$$R = 2,82 \text{ MPa}$$

- **Muestra 2:** La probeta fue ensayada en condición de saturación, alcanzando una carga máxima de **202 N** al momento de la falla. Su comportamiento resultó equivalente al observado en Los paneles anteriores, sin presentar variaciones significativas en el proceso de fractura.



Imagen 29: Grieta del resultado de la falla.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 30: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura.

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(202)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{151500}{50000}$$

$$R = 3,03 \text{ MPa}$$

- **Muestra 3:** La probeta fue ensayada en condición de saturación, alcanzando una carga máxima de **191 N** al momento de la falla. Su comportamiento fue coherente con el de las muestras anteriores, manteniendo una respuesta similar durante el proceso de fractura y sin evidenciar variaciones significativas respecto a los resultados previos tanto en saturadas, como en las no saturadas.



Imagen 31: Aparición de grieta después de fallada.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 32: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura.

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(191)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{143250}{50000}$$

$$R = 2,86 \text{ MPa}$$

- **Comparación de las 3 muestras saturadas:** Se observó un comportamiento semejante en las tres muestras, tanto en los tiempos de ruptura como en las deformaciones y niveles de resistencia alcanzados, lo que demuestra una tendencia estable en el desempeño del material. Las diferencias registradas entre los valores son mínimas, lo que refuerza la homogeneidad y confiabilidad de los datos dados.
A continuación, se presenta un análisis estadístico que facilita la comprensión y comparación de los datos registrados.

Tabla 3: Comparación de resultados de muestras saturadas.

Muestra Saturada	Módulo de rotura
1	2,82 MPa
2	3,03 MPa
3	2,86 MPa

Estadística

Promedio de Resistencia = 2,9 MPa

Varianza = 0,012

Desviación estándar = 0,11

Coeficiente de Variación = 0.03

4.2.3 COMPARACIÓN DE LOS DATOS DE LOS PANELES SATURADOS Y NO SATURADOS

Aunque se realizaron ensayos tanto en paneles saturados como no saturados, no se evidenció una diferencia significativa en los resultados obtenidos. Por lo tanto, se puede concluir que la presencia de humedad no afecta de manera relevante el comportamiento estructural de los paneles frente a la carga aplicada.

Tabla 4: Comparación de resultados de muestras saturadas y no saturadas.

	NO SATURADO	SATURADO	DIFERENCIA DE PROMEDIO
	2,94 MPa	2,82 MPa	
	2,65 MPa	3,03 MPa	
	3,19 MPa	2,86 MPa	
PROMEDIO	2,91 MPa	2,9 MPa	0,013

- **Análisis de graficas:** En una primera etapa, el material presenta un comportamiento elástico, caracterizado por pequeñas deformaciones y una relación lineal entre carga y deformación. Posteriormente, se observan deformaciones mayores con una carga prácticamente constante, lo que evidencia un comportamiento dúctil del material. Finalmente, se produce un incremento significativo de la carga hasta la falla, indicando un proceso de endurecimiento previo a alcanzar el punto de ruptura.

4.2.4 DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD

Después de que el panel estuvo 24h en agua para su saturación, pesando **2577 gr**, después se envió al horno de secado durante 12h a 100°C para determinar su masa en seco, el valor dado fue **2243gr** a continuación se halla la densidad y el contenido de humedad.

- **Densidad en seco:**

$$\rho = \frac{m_s}{V}$$

$$\rho = \frac{2243}{1250}$$

$$\rho = 1,79 \text{ gr/cm}^3$$

- **Contenido de humedad:**

$$w = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$$

$$w = \frac{2577 - 2243}{2243} \times 100$$

$$w = 14,8\%$$

4.3 COMPORTAMIENTO FISICO Y MECANICO DE LOS PANELES CON DIFERENTES TIEMPOS DE FRAGUADO.

Se elaboraron seis muestras con distintos tiempos de fraguado, con el propósito de analizar cómo influye este factor en la resistencia a la carga y en el modo de falla de los paneles.

Las muestras se agruparon de la siguiente manera:

- Dos con 7 días de fraguado
- Dos con 14 días de fraguado
- Dos con 28 días de fraguado

Las pruebas se realizaron en la máquina multiensayos, aplicando la carga en el punto central del espécimen bajo condiciones controladas. Durante el ensayo se registró el valor máximo de resistencia expresado en **Newtons (N)**. Las condiciones operativas de la máquina fueron exactamente las mismas utilizadas en los ensayos previos, tanto en estado saturado como en estado no saturado, garantizando la comparabilidad de los resultados.

4.3.1 PANELES CON 7 DÍAS DE FRAGUADO

Las primeras dos muestras, con un tiempo de fraguado de 7 días, mostraron un comportamiento similar al observado en los ensayos anteriores realizados sobre paneles saturadas y no saturadas. Sin embargo, se evidenció una ligera mejora en la resistencia debido al incremento en el tiempo de curado. El promedio de carga para este grupo fue de aproximadamente 256 N. Durante la prueba, la grieta principal apareció de forma progresiva, sin desprendimiento de material, indicando una buena cohesión entre el cemento y el residuo textil.

- **Muestra 1:** resistencia máxima de 249 N

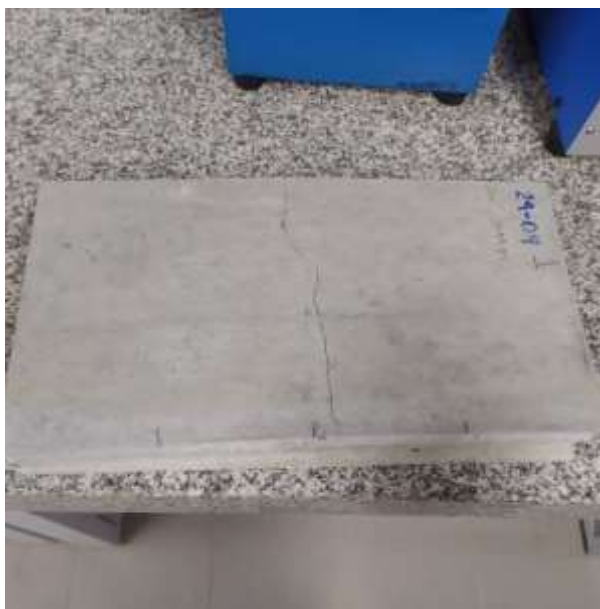


Imagen 33: Aparición de grieta después de fallada.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 34: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura:

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(249)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{186750}{50000}$$

$$R = 3,73 \text{ MPa}$$

- **Muestra 2:** resistencia máxima de 263 N



Imagen 35: Aparición de la grieta después de la falla.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 36: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura:

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(263)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{197250}{50000}$$

$$R = 3,94 \text{ MPa}$$

4.3.2 PANELES CON 14 DÍAS DE FRAGUADO

Las dos muestras con 14 días de fraguado mostraron un incremento notable en la resistencia, manteniendo un comportamiento estructural estable y una propagación uniforme de las grietas. El promedio de carga registrado para este grupo fue de 323 N. Los paneles conservaron una apariencia íntegra tras la falla, sin desprendimiento de material.

- **Muestra 3:** resistencia máxima de 335 N



Imagen 37: Aparición de la grieta después de fallada.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 38: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura:

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(335)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{251250}{50000}$$

$$R = 5,02 \text{ MPa}$$

- **Muestra 4:** resistencia máxima de 311 N



Imagen 39: Aparición de grieta después de la falla.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 40: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura:

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(311)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{233250}{50000}$$

$$R = 4,66 \text{ MPa}$$

4.3.3 PANELES CON 28 DÍAS DE PRAGUADO

En las muestras con un tiempo de fraguado de 28 días, se observó un mayor incremento en la resistencia mecánica, evidenciando la etapa de madurez del material. En todos los casos, el modo de falla fue similar: aparición de una grieta transversal central, alineada con el punto de aplicación de la carga. Ninguna muestra presentó desprendimiento de material, lo que confirma un buen grado de consolidación y unión entre las fibras y la matriz cementicia. El promedio de carga obtenido fue de 407 N.

- **Muestra 5:** resistencia máxima de 415 N



Imagen 41: Aparición de grieta después de fallada.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 42: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura:

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(415)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{311250}{50000}$$

$$R = 6,22 \text{ MPa}$$

- **Muestra 6:** resistencia máxima de 399 N

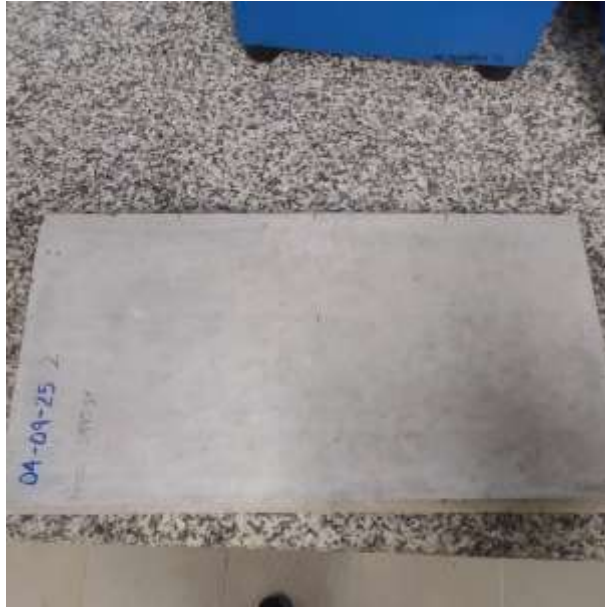


Imagen 43: Aparición de grieta después de fallada.

A continuación, se presenta la gráfica de **carga (kN) vs deformación (mm)** y el cálculo del módulo de ruptura, obtenido mediante la ecuación definida en la Norma correspondiente.



Imagen 44: Gráfica Carga vs Deformación.

Obtención del módulo de ruptura:

$$R = \frac{3PL}{2be^2}$$

$$R = \frac{3(399)(250)}{2(250)(10)^2}$$

$$R = \frac{299250}{50000}$$

$$R = 6 \text{ MPa}$$

4.3.4 COMPARACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS SEGÚN SU TIEMPO DE FRAGUADO.

Al comparar los tres grupos de paneles, se observa una relación directamente proporcional entre el tiempo de fraguado y la resistencia a la carga.

Las muestras de 7 días presentaron un comportamiento inicial adecuado, pero con una resistencia limitada (promedio 256 N), teniendo un módulo de ruptura promedio de 3.8 MPa.

Las muestras de 14 días mostraron una mejor compactación interna y un incremento significativo de la resistencia (promedio 323 N), subiendo su módulo de ruptura a 4.81 MPa.

Finalmente, las muestras de 28 días alcanzaron la máxima resistencia promedio (407 N), con un módulo de ruptura de 6.05 MPa, evidenciando el proceso completo de hidratación del cemento y una matriz más densa y estable.

Tabla 5: Comparación de resultados de diferentes tiempos de fraguado.

TIEMPO DE FRAGUADO	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS
MUESTRA 1	3.7 MPa	5.02 MPa	6.2 MPa
MUESTRA 2	3.9 MPa	4.6 MPa	5.9 MPa
PROMEDIO	3.8 MPa	4.81 MPa	6.05 MPa

4.4 PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS PANELES EN SITUACIÓN DE INCENDIO

Análisis del comportamiento de paneles en situación de incendio (ASTM E84)

a) Objetivo general

Elaborar y ejecutar una metodología de ensayo para evaluar el comportamiento superficial (propagación de llama y desarrollo de humo) de paneles mediante la norma ASTM E84 (Túnel de Steiner), incluyendo: preparación de muestras, montaje, ejecución de ensayos, análisis de resultados y estimación de presupuesto para la construcción/compra del equipo y ejecución de las pruebas.

b) Alcance y resultados esperados

- Clasificar el panel según Flame Spread Index (FSI) y Smoke Developed Index (SDI) conforme ASTM E84.
- Identificar comportamientos singulares (derrame, delaminación, fusión) que puedan sesgar la interpretación del índice.
- Proveer recomendaciones de diseño o tratamiento (retardantes, soporte trasero, cambios geométricos) según resultados y datos complementarios (cone calorimeter si aplica).

c) Metodología (paso a paso)

Referencia normativa

Ensayo conforme a ASTM E84 — Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials (Steiner tunnel). El método mide la propagación de la llama y densidad de humo durante 10 minutos en una cámara tipo túnel.

Preparación y cantidad de muestras

Dimensiones y montaje: ASTM E84 se realiza con una muestra equivalente a 288 in de longitud y 20–24 in de ancho en el túnel; lo habitual en laboratorios es fabricar secciones de 2 ft × 8 ft (0.61 × 2.44 m) y ensamblarlas (normalmente 3 secciones) para completar la longitud exigida. La norma y los informes de laboratorio describen estas prácticas de montaje.

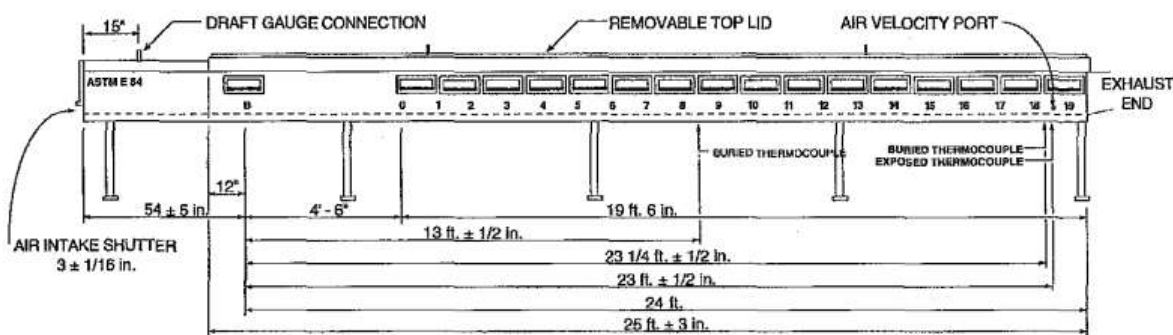


Imagen 45: Dimensiones y partes del túnel de Steiner.

Adaptado de: ASTM E84-01: Standard test method for surface burning characteristics of building materials (ASTM International, 2001, p. 2).

Número de ensayos: mínimo 1 ensayo por formulación; lo recomendable es 3 muestras por variante para asegurar reproducibilidad (o al menos 2+1 de confirmación).

Condicionamiento: acondicionar las muestras en cámara a 23 ± 5 °C y humedad relativa ~50% durante mínimo 72 h antes del ensayo (práctica común en informes de laboratorio).

Montaje

Montaje en posición de techo (superficie a evaluar boca abajo hacia fuente de ignición) siguiendo las guías de montaje de la norma (soportes o mallas si la pieza lo requiere; se registrará el método usado porque puede afectar resultados).

Instrumentación y medidas recogidas

- Observación y cronometraje de la propagación de la llama a través de ventanas laterales.
- Registro de la Flame Spread Index (FSI) y Smoke Developed Index (SDI) calculados por el sistema del túnel.
- Registro fotográfico/vídeo y notas de comportamiento (derrame, delaminación, goteo, autoextinción).

Ensayos complementarios: cone calorimeter (ASTM E1354) para obtener tasa de liberación de calor (HRR), tiempo a ignición y cálculo del potencial de crecimiento de incendio; útil para explicar resultados E84 y para modelado.

Seguridad y ventilación

Sistema de extracción de humos acorde a la capacidad del túnel, monitorización de gases y extinción de seguridad. El laboratorio debe contar con permisos y procedimientos escritos de operación segura del equipo.

d) Plan de elaboración de muestras

- Diseño: especificar tamaño final del panel, espesor, acabados y variantes (sin tratamiento, con retardante, con respaldo diferente).
- Corte y unión: producir secciones 2 ft × 8 ft; comprobar planicidad y unir con procedimiento que simule la instalación real (si aplica).
- Anotaciones: etiquetar cada sección con ID, fecha de fabricación, lote de materiales y procedimiento de curado.
- Curado/fragüado: respetar los tiempos de curado de la mezcla, registrar humedad y temperatura.
- Condicionamiento: 72 h en cámara a 23 ± 5 °C y 50% RH.

e) Análisis de resultados y criterios de aceptación

- Comparar FSI y SDI obtenidos con límites de código aplicables.
- Complementar con observaciones físicas (derrame, goteo, agrietamiento).
- Si se dispone de cone calorimeter, correlacionar HRR y parámetros con predicción de comportamiento en E84.

4.5 ANALISIS ECONOMICO Y AMBIENTAL

El propósito de este análisis es evaluar la viabilidad ambiental y económica del panel experimental fabricada a partir de residuos textiles posconsumo y cemento, con el fin de determinar su potencial uso en el sector de la construcción como alternativa sostenible a materiales convencionales como el Superboard. El estudio integra criterios de sostenibilidad basados en los principios del **Análisis del Ciclo de Vida (ACV)**, definidos por la **norma ISO 14040 (2006)**, y una estimación de los costos directos de producción. Ambos espacios permiten

una comparación técnica entre el material desarrollado en el laboratorio y los materiales comerciales disponibles actualmente en el mercado colombiano.

4.5.1 ANALISIS ECONOMICO

El análisis económico se basa en la producción experimental de un panel de 25 cm × 50 cm × 10 mm, utilizando las siguientes proporciones de material, sin incluir el costo de mano de obra:

Tabla 6: Costo de producción.

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO
CEMENTO	1828 gr	\$ 1.828
RESIDUO TEXTIL	97 gr	---
MOLDE	-----	\$ 50.000
TOTAL		\$ 51.828

Hay que tener en cuenta que el molde o encofrado se puede reutilizar dos veces, el costo directo del cemento se estimó en \$1.000/kg, con base en el valor promedio de mercado del cemento gris en Colombia en 2025 y el residuo textil no tiene costo alguno ya que fue dado de pequeñas fábricas.

Luego de conocer el costo de producción del panel a escala, se escaló al material comercial equivalente al Superboard, que mide 1,22 m × 2,44 m × 8 mm, con un área de 2,9768 m² y un volumen de 0,0238 m³. El factor de escala entre los dos tableros fue de 19,05 veces, lo que resultó en los siguientes requerimientos de material:

Tabla 7: Costo de producción a escala comercial.

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO
CEMENTO	34,83 kg	\$ 34.826
RESIDUO TEXTIL	1,8 kg	---
MOLDE	-----	\$ 2.381
TOTAL		\$ 37.207

Para estimar el costo del molde a escala comercial, se utilizó una relación proporcional entre áreas, considerando que el molde original (0,125 m²) cuesta \$ 50.000. Así, el molde grande tendría un costo estimado de \$1.190.720, amortizado en 500 usos (vida útil proyectada en un escenario semiindustrial), lo que representa COP 2.381 por panel.

Si dividimos el costo de producción a escala que es \$ 37.207 entre el área total (2,9768 m²), el costo por metro cuadrado es de \$12.500. Por otro lado, los precios de mercado del Superboard 1,22x2,44x8 mm, consultados en los portales Homecenter (2025) y Eternit (2025), oscilan entre \$75.300 y \$83.900 por unidad, lo que equivale a \$25.300–\$28.200 COP/m².

Tabla 8: Comparación económica entre el panel experimental y el Superboard.

PRODUCTO	DIMENSIONES (m)	COSTO TOTAL (\$/PANEL)	COSTO POR M ² (\$/M ²)	OBSERVACIONES
PANEL EXPERIMENTAL	1.22 × 2.44 × 0.008	37.207	12.500	Costo de producción; incluye amortización del molde.
SUPERBOARD COMERCIAL	1.22 × 2.44 × 0.008	75.300 83.900	25.300 28.200	Precio de mercado (Eternit, 2025; Homecenter, 2025).

4.5.2 ANALISIS AMBIENTAL

Para evaluar el desempeño ambiental, se realizó un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) simplificado, considerando los insumos y procesos de la etapa de fabricación del panel experimental.

En el panel a escala (25 cm × 50 cm × 10 mm) se emplearon 750 ml de agua en la mezcla y 1.5 L de agua para fraguado. Escalando al formato comercial mediante el mismo factor volumétrico (19,05), se obtuvieron los siguientes valores:

- Cemento: 34.83 kg
- Residuo textil: 1.85 kg
- Agua total: 42.86 L por placa (14.4 L/m²)

El cemento constituye el principal origen de emisiones. Según Scrivener, John y Gartner (2018), se puede determinar que el factor promedio de emisión para el cemento es de 0.75 kg CO₂e/kg. Así, las emisiones derivadas del uso de cemento son:

$$34.83 \text{ kg} \times 0.75 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} = 26.12 \text{ kg CO}_2\text{e/placa}$$

El residuo textil, al ser posconsumo, se considera ambientalmente neutro y, al analizar Zamani (2016) y Cuc y Vidovic (2021), su reutilización evita aproximadamente 6.1 kg CO₂e/kg frente a la disposición final. Por tanto, el crédito ambiental obtenido es:

$$1.85 \text{ kg} \times 6.1 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} = 11.29 \text{ kg CO}_2\text{e evitados}$$

El balance neto de emisiones resulta:

$$26.12 - 11.29 = 14.83 \text{ kg CO}_2\text{e/placa}$$

Al dividir entre el área (2.9768 m²), la huella de carbono específica es de 4.98 kg CO₂e/m². Según la Declaración Ambiental de Producto de Etex Colombia S.A. (2024), la huella de carbono del Superboard de 10 mm es de aproximadamente 5,52 kg CO₂e/m² correspondientes a la producción del material bajo el enfoque cradle-to-gate.

Tabla 9: Comparación ambiental entre el panel experimental y el superboard.

INDICADOR	PANEL EXPERIMENTAL	SUPERBOARD
EMISIONES POR CEMENTO (Kg CO ₂ E/m ²)	8.78 (sin crédito textil)	11–13
CRÉDITO AMBIENTAL POR TEXTIL (Kg CO ₂ e/m ²)	–3.80	—
HUELLA NETA (Kg CO ₂ e/m ²)	≈ 4.98	≈ 12.0
CONSUMO TOTAL DE AGUA (L/m ²)	14.4	9–12

El valor negativo correspondiente al *crédito ambiental por textil* (–3.80 kg CO₂e/m²) se obtiene a partir de la cantidad de residuo textil incorporada en cada placa (1.85 kg) y del factor de ahorro de emisiones analizados en Zamani (2016) y Cuc y Vidovic (2021), por la cual se estima que la reutilización de 1 kg de textil evita aproximadamente 6.1 kg CO₂e respecto a su disposición en rellenos sanitarios o incineración. En consecuencia, el crédito total por placa equivale a 11.29 kg CO₂e evitados, que, al dividirse entre el área total de 2.9768 m², da como resultado un beneficio ambiental de –3.80 kg CO₂e/m². Este valor se incorpora en el balance ambiental para reflejar la reducción neta de emisiones asociada al aprovechamiento de residuos textiles posconsumo.

El resultado muestra que el panel experimental reduce aproximadamente un 9.78% las emisiones de CO₂e respecto al Superboard. Si bien el consumo de agua es ligeramente superior, este impacto se compensa con la ausencia de procesos térmicos y el secado al aire libre, que minimizan el uso de energía eléctrica.

En términos ambientales, la propuesta se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 y 13, al promover la gestión responsable de recursos y la acción climática (ONU, 2020).

5 CONCLUSIONES

Análisis de diferentes porcentajes de cemento y residuo textil para determinar la cantidad óptima en función de su manejo y acabado.

Las pruebas iniciales mostraron que la proporción ideal de mezcla era de un 5% de residuos textiles triturados y un 95% de cemento, lo que ofrece mejores resultados en cuanto a trabajabilidad, cohesión, adhesión y acabado superficial. Las mezclas con un mayor porcentaje de residuos textiles presentaron defectos significativos, como baja trabajabilidad, desprendimiento de fibras y pérdida de material durante el secado o el contacto con el agua, lo que afectó negativamente a su consistencia y uniformidad. La dosificación elegida garantizó una mezcla homogénea y estable, con una textura pastosa, adecuada para el moldeo y una buena integración entre los componentes, lo que facilita su manipulación y compactación. En este sentido, los resultados confirman que la proporción del 5% de residuos textiles no compromete la estructura interna del material, sino que le proporciona flexibilidad y reduce el consumo de cemento, convirtiéndolo en una alternativa adecuada y sostenible para la fabricación de paneles divisorios en el sector de la construcción.

Análisis del comportamiento de los paneles elaborados en condiciones de saturación y no saturación en agua.

Los ensayos de flexión realizados de acuerdo con la norma NTC 4373:1997 mostraron que los paneles producidos mantuvieron un comportamiento mecánico estable tanto en condiciones secas como saturadas. La diferencia observada en el módulo de ruptura entre ambas condiciones fue mínima (2,91 MPa en seco y 2,90 MPa en saturado), lo que indica que la presencia de humedad no afectó significativamente la resistencia del material, característica especialmente importante para su aplicación en ambientes con humedad variable. Si bien las muestras no alcanzaron la clasificación regulatoria completa debido al tiempo de curado limitado, mantuvieron su integridad estructural durante todo el ensayo, sin delaminación ni formación de residuos, y demostraron buena cohesión interna y durabilidad contra la absorción de agua. Estos resultados permiten concluir que el material ofrece suficiente resistencia y un rendimiento confiable, reafirmando su potencial como una alternativa ecológica a los paneles convencionales en la construcción no estructural.

Examen de la variación de la resistencia de los paneles en función de diferentes tiempos de fraguado.

El análisis de los tiempos de fraguado (7, 14 y 28 días) mostró una relación directa entre el tiempo de curado y la resistencia a la carga. Las muestras alcanzaron valores de módulo de ruptura de 3.8 MPa, 4.8 MPa y 6.05 MPa, respectivamente, confirmando que el proceso de hidratación del cemento es crucial para la compactación de la matriz y la adhesión al residuo textil. Con el aumento del tiempo de fraguado, se logra la formación de compuestos cementantes responsables de la resistencia óptima, resultando en un aumento en la resistencia y estabilidad estructural del panel. Con base en estos resultados, se determinó un tiempo mínimo de curado de 28 días como el tiempo más adecuado para asegurar el desempeño mecánico del material. De acuerdo con los parámetros establecidos en la NTC 4373:1997, los paneles

desarrollados pueden clasificarse como tipo B2, lo cual cumple con los requisitos básicos para elementos no estructurales y demuestra que se pueden incorporar residuos textiles sin comprometer la resistencia ni el desempeño del producto final.

Propuesta para el análisis del comportamiento de los paneles en situación de incendio.

Se desarrolló una propuesta técnica basada en la norma ASTM E84 (Ensayo de Túnel Steiner), que establece procedimientos para evaluar la propagación de llama superficial y la generación de humo en materiales de construcción. La propuesta incluye una descripción detallada de los pasos de preparación de la muestra, ensamblaje, ejecución de la prueba y análisis de resultados, adaptada a las condiciones colombianas para su aplicación final en laboratorios acreditados por ONAC. La propuesta técnica constituye una guía metodológica clara y estandarizada que permite la evaluación precisa del comportamiento al fuego de paneles fabricados con residuos textiles, garantizando que su desempeño cumpla con los requisitos de seguridad y prevención de incendios establecidos por las normas internacionales. Su implementación también contribuirá a fortalecer la validación técnica y comercial de este material, allanando el camino para su futura certificación como un producto de construcción sostenible y seguro.

Viabilidad ambiental y económica de la fabricación y aplicación de estos paneles en el sector de la construcción.

El análisis integral de los aspectos económicos y ambientales muestra que los paneles fabricados con residuos textiles y cemento son una alternativa viable, sostenible y competitiva a materiales comerciales como Superboard. Con un costo de producción estimado de \$12.500 COP/m² representa una reducción de más del 50% en comparación con el valor de mercado de paneles equivalentes (\$25.000 a \$28.000 COP/m²). Además, la huella de carbono calculada ($\approx 4,98$ kg CO₂e/m²) muestra una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero gracias al uso de residuos textiles locales y la reducción en la demanda de recursos naturales. Estos resultados no solo confirman la validez técnica y ambiental de este material, sino que también resaltan su potencial de impacto social y económico, promoviendo una economía circular, reduciendo la generación de residuos y fomentando la innovación en materiales de construcción sostenibles. En general, los hallazgos respaldan la hipótesis de que la incorporación de residuos textiles triturados en la producción de paneles puede transformar positivamente las prácticas de construcción y contribuir a una arquitectura más responsable y eficiente alineada con los objetivos de desarrollo sostenible.

6 RECOMENDACIONES PARA OTROS PROYECTOS

- **Evaluación del rendimiento mecánico con mayores porcentajes de residuos textiles:**
Se recomienda realizar pruebas adicionales con proporciones superiores al 5% de residuos textiles triturados para explorar las limitaciones de la composición del material sin comprometer la adhesión ni la resistencia estructural. Este análisis determinará el equilibrio ideal entre estabilidad y rendimiento mecánico, y también explorará la posibilidad de reducir aún más el consumo de cemento en la mezcla.
- **Uso de recubrimientos protectores o aditivos en la mezcla:**
Se recomienda investigar el uso de recubrimientos superficiales, selladores o aditivos químicos (como resinas, hidrófugos o plastificantes) que ayuden a mejorar la durabilidad del material frente a la humedad, la abrasión y los factores ambientales. Esta estrategia puede reducir la degradación de los residuos textiles, prolongar la vida útil de los paneles y ampliar su gama de aplicaciones tanto en interiores como en exteriores.
- **Ensayos de durabilidad y envejecimiento acelerado:**
Con esto se busca evaluar el comportamiento del material en condiciones ambientales extremas, como la exposición prolongada a la intemperie, la humedad y los ciclos de secado, la radiación solar o los cambios de temperatura. Estos ensayos permiten estimar la resistencia a largo plazo y la estabilidad dimensional del material, aspectos esenciales para su validación como producto de construcción sostenible.
- **Análisis de las propiedades termoacústicas del material:**
Dado que la porosidad y la composición de los residuos textiles pueden ofrecer propiedades significativas en este sentido, se recomienda realizar ensayos para determinar la capacidad de aislamiento térmico y acústico de los paneles. Los resultados de estos ensayos permiten clasificar este material no solo como un elemento de separación, sino también como una solución práctica para mejorar la eficiencia energética y el confort ambiental en los edificios.
- **Evaluación adicional del comportamiento al fuego:**
Se recomienda realizar ensayos experimentales según la norma ASTM E84 en un laboratorio acreditado para obtener resultados cuantitativos sobre la propagación de la llama y la producción de humo. Esta información será esencial para verificar la seguridad contra incendios de este material y complementar la propuesta técnica desarrollada en este estudio.

7 BIBLIOGRAFIA

- Alarcón, N. D. & Díaz, J. P. (2023). Obtención de paneles de drywall a partir de residuos textiles de algodón y poliéster con un bioaglomerante de yuca. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.14625/22526>
- American Psychological Association. (2020). Publication manual of the American Psychological Association (7th ed.). APA.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). AIS.
- ASTM International. (2023). ASTM E84-23: Standard test method for surface burning characteristics of building materials. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0084-23>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2022). Gestión de residuos textiles en América Latina. BID. <https://www.iadb.org>
- Brut. (2020). This architect transforms used textiles into bricks [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=3UrBgMf1554>
- Castillo Rodríguez, A. P., & García Navarro, J. (2023). Compuestos de yeso con adición de fibras textiles posconsumo de algodón. *Informes De La Construcción*, 75(571), e506. <https://doi.org/10.3989/ic.6205>
- Castro Pérez, V. K. (2018, diciembre). Manejo de residuos sólidos del sector textil en Colombia basado en el modelo de economía circular [Trabajo de grado]. Universidad Militar Nueva Granada.
- CDT. (2022). FabBRICK: Ladrillos aislantes térmicos y acústicos hechos de ropa. <https://www.cdt.cl/fabbrick-ladrillos-aislantes-termicos-y-acusticos-hechos-de-ropa/>
- Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (2023). Incorporación de residuos textiles de algodón posconsumo en compuestos de yeso. *Informes de la Construcción*, 75(569), e523. <https://doi.org/10.3989/ic.2023>
- Cuc, S., & Vidović, M. (2011). Environmental sustainability through clothing recycling. *OSCM Journal*, 4(2), Article 64. <https://doi.org/10.31387/oscm0100064>
- Ecoinvent. (2023). Ecoinvent database v3.9.1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. <https://www.ecoinvent.org>
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. Ellen MacArthur Foundation.
- El Español. (2024). La startup francesa que construye casas con ropa usada. https://www.elespanol.com/enclave-ods/historias/20240508/startup-francesa-construye-casas-ropa-usada-fabrica-ladrillos-aislantes-calor-ruido/853414948_0.html
- Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Textile waste generation and recycling data. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov>
- European Environment Agency. (2023). Textile waste and circular economy in Europe. EEA. <https://www.eea.europa.eu>
- FabBrick. (2023). Transforming textile waste into construction materials. FabBrick. <https://www.fab-brick.com>

- FashNerd. (2023). Turning textile waste into building blocks: FabBRICK's revolutionary sustainable initiative. <https://fashnerd.com/2023/07/turning-textile-waste-into-building-blocks-fabbricks-revolutionary-sustainable-initiative/>
- García-Salmones Chobotov, L. (2021). Residuos textiles: diagnóstico y perspectiva de futuro sostenible. Repositorio digital de la Universidad del País Vasco.
- García-Martínez, P., Muñoz, L., & Rivas, C. (2023). Textile fiber composites for sustainable building materials. *Construction and Building Materials*, 365, 130123.
- González, J., & Pérez, M. (2019). Análisis de materiales reciclados en la construcción sostenible. *Revista de Ingeniería y Medioambiente*, 35(2), 45–60.
- González, L., & Vargas, J. (2022). Fibras recicladas en paneles aislantes para edificaciones sostenibles. *Revista Mexicana de Ingeniería Civil*, 30(2), 61–74.
- González, L., Pérez, R., & Martínez, J. (2018). Reciclaje de materiales textiles en la construcción. Editorial Académica.
- ICONTEC. (1983). NTC 1881:1983. Comportamiento al fuego de materiales de construcción. Ensayo a la llama de alcohol. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC.
- ICONTEC. (1997). NTC 4373:1997. Características y métodos de control y ensayo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. ICONTEC.
- ICONTEC. (2023). NTC 5617: Uso de materiales reciclados en la construcción. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2022). Normas ICONTEC aplicables a materiales de construcción sostenibles. ICONTEC.
- ISO. (2023). ISO 14021: Environmental labels and declarations — Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling). International Organization for Standardization.
- ISO. (2006). ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. International Organization for Standardization.
- IVACE+i. (2024, 24 de mayo). IVACE+i respalda la fabricación de paneles decorativos para la construcción a base de residuos textiles reciclados. IVACE. <https://www.ivace.es/index.php/es/noticias/notas-de-prensa/56495-ivace-i-respalda-la-fabricacion-de-paneles-decorativos-para-la-construccion-a-base-de-residuos-textiles-reciclados>
- La Cuisine International. (2023). FabBRICK: Los ladrillos que revolucionan la arquitectura. <https://www.lacuisineinternational.com/es/noticias/acerca-de-la-cuisine-international/fabbrick-los-ladrillos-que-revolucionan-la-arquitectura/>
- López, M., García, F., & Romero, T. (2022). Acoustic absorption in recycled textile panels. *Materials Today: Sustainability*, 19, 100219.
- Martín, D., López, A., & Serrano, M. (2023). Recy-Block: Sustainable modular systems using textile and plastic waste. *Sustainable Construction Review*, 5(1), 77–89.
- Martínez, J., & Pérez, R. (2019). Sostenibilidad en la construcción: Uso de materiales reciclados. Ediciones Técnicas.
- Martínez, P., & Rojas, L. (2021). Mechanical behavior of cementitious composites with textile fibers. *Materials Science Forum*, 1032, 122–130.

- Merlet, C. (2019). FabBRICK: Transforming textile waste into bricks. FabBRICK. <https://www.fab-brick.com/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Gestión de residuos textiles en Colombia: avances y retos. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Estrategia Nacional de Economía Circular. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/>
- ONU. (2019). Informe sobre los impactos ambientales de la industria textil. Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment>
- ONU. (2020). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Parametric Architecture. (2023). Transforming textiles into bricks: FabBRICK. <https://parametric-architecture.com/transforming-textiles-into-bricks-fabbrick/>
- Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). (2023). Diagnóstico de residuos textiles en Bucaramanga. Alcaldía de Bucaramanga.
- Ramírez, L., & Torres, P. (2021). Materiales alternativos en la construcción sostenible. Editorial Universitaria de Colombia.
- Residuos Profesional. (2023). Paneles aislantes fabricados con residuos textiles reciclados en España. Recuperado de <https://www.residuosprofesional.com>
- Residuos Profesional. (2024). La Universidad Politécnica de Madrid estudia el uso de residuos textiles en la construcción. Recuperado de <https://www.residuosprofesional.com>
- Rodríguez, C. (2020). Evaluación de residuos textiles en la construcción. *Revista de Construcción Sostenible*, 28(3), 75–90.
- Rodríguez, A., & Pérez, J. (2023). Thermal and acoustic performance of textile waste panels for interior architecture. *Journal of Green Building*, 18(2), 22–34.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Shen, B., Wang, Y., & Zhang, L. (2020). Pre-consumer textile waste classification and reuse. *Textile Research Journal*, 90(4), 427–438.
- Smith, J., & Brown, T. (2020). Environmental impact of textile waste and recycling methods. *Journal of Environmental Studies*, 35(4), 245–260.
- Smith, R., & Williams, D. (2021). Post-consumer textile waste: Environmental challenges and circular solutions. *Journal of Sustainable Materials*, 7(2), 89–103.
- Unión Europea. (2023). Reglamento de Productos de Construcción (UE) No. 305/2011. Diario Oficial de la Unión Europea.
- Universidad Politécnica de Cataluña. (2024). Desempeño térmico de compuestos con residuos textiles reciclados. UPC. <https://www.upc.edu/es/sala-de-prensa/noticias/el-grupo-de-investigacion-tectex-crea-un-nuevo-material-para-la-construccion-con-residuos-de-ropa-usada#>

- Universidad Politécnica de Madrid. (2023). Estudio sobre el aprovechamiento de residuos textiles en paneles para construcción. Escuela Técnica Superior de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid.
- World Green Building Council. (2020). Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector. WGBC.
- World Commission on Environment and Development. (1987). Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford University Press.
- Zamani, B., Svanström, M., Peters, G., & Rydberg, T. (2015). A carbon footprint of textile recycling: A case study in Sweden. *Journal of Industrial Ecology*, 19(4), 676–687. <https://doi.org/10.1111/jiec.12208>